

Janne Alaluusua

AUDI A1:N TAKAJOUSITUKSEN UUSKONSTRUKTIO

AUDI A1:N TAKAJOUSITUKSEN UUSKONSTRUKTIO

Janne Alaluusua
Opinnäytetyö
Syksy 2015
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

Tekijä: Janne Alaluusua
Opinnäytetyön nimi: Audi A1:n takajousituksen uuskonstruktio
Työn ohjaaja: Mauri Haataja
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2015 Sivumäärä: 61 + 2 liitettä

Opinnäytetyön aihe on Audi A1 -merkkisen henkilöauton taka-akselin pyörätuennan uudelleen suunnittelu. Tarkoituksena oli korvata ajoneuvon tehdasasenteinen pyörätuenta erillistukivarsijousituksella ajoneuvon ajo-ominaisuuksien parantamiseksi. Työn tilaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulu. Työssä on esitetty Oulun ammattikorkeakoulun auto- ja kuljetustekniikan oppilaiden aloittaman ST-Audi-projektin yhtä osaprojektia. Vaatimuksena työllä oli turvallisuus, toimivuus. ja rakenteiden yksinkertaisuus.

Opinnäytetyöraportissa käsitellään ajoneuvon ajo-ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä, pyörätuennarakenteisiin kohdistuvien voimien määrittystä ja lujuusmitoitusta sekä pyörätuennan osien materiaalien valintaa. Ajo-ominaisuuksiin vaikuttavat pyöräkulmat, pyörän ja renkaan ominaisuudet sekä heilahduksen vaimennus.

Tavoitteena oli suunnitella Solidworks-ohjelmalla uusi erillistukivarsipyörätuenta ajoneuvoon. Aluksi täytyi pohtia paras mahdollinen pyörätuennaratkaisu useiden vaihtoehtojen joukosta. 3D-malli uuskonstruktiosta pohjautuu tarkkoihin mittoihin ajoneuvon rungosta, jarruista ja pyörännapa-akselista. Pyörätuenta suunnitellaan siten, että se voidaan valmistaa 3D-mallien mukaisesti ja kiinnittää autoon muutamalla kiinnikkeellä.

Lujuusmitoituksessa käytettiin Solidworks-ohjelman lujuusanalyysitoimintoa, jossa pyörätuennan osat simuloitiin yksitellen rasituksessa. Näin pyrittiin varmistamaan rakenteen kestävyys eri kuormituksissa. Tarvittaessa rakenteita ja materiaaleja muutettiin, jotta ne kestäisivät paremmin.

Tuloksena syntyi ajoneuvon takapyörätuennan uuskonstruktion suunnitelma, joka voidaan rakentaa ajoneuvoon oppilastyönä opinnäytetyön tuloksena syntyneiden 3D-mallien pohjalta. 3D-mallit jaettiin projektin Optima-tietokantaan.

Asiasanat: pyörätuenta, jousitus, kilpa-auto, 3D-suunnittelu

ALKULAUSE

Audi A1:n takajousituksen uuskonstruktio oli yksi osa-alue Oulun ammattikorkeakoulun ST-Audi-projektin osaprojektissa. Olen ollut projektissa mukana vuodesta 2014 asti, jolloin ajoneuvo saapui autolaboratorion käyttöön ja siitä alettiin muokkaamaan autotekniikan opiskelijoille tutkimusautoa ratakäyttöön.

Haluan kiittää Oulun ammattikorkeakoulun yliopettaja, professori Mauri Haatajaa ja erikoisasiantuntija Arto Lehtosta. Kiitokset myös opettaja Esa Kontiolle, jonka opastus Solidworksin FEM-analyysiin oli ratkaiseva lujuusanalyysin onnistumisen kannalta. Kiitän myös ST-Audi-projektin yhteistyökumppaneita, jotka tukivat projektia rahallisesti tai muulla rahan arvoisella tavaralla.

Haluan myös lämpimästi kiittää ST-Audi-projektin jäseniä ja luokkatovereita upeasta yhteistyöstä, hyvistä ideoista ja asiantuntemuksesta pienien ja isojen ongelmien ylittämässä.

Oulussa 9.12.2015

Janne Alaluusua

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 AJO-OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	8
2.1 Pyöräkulmien vaikutus ajettavuuteen	8
2.1.1 Camber	8
2.1.2 Caster	10
2.1.3 Toe eli aurasikulma	11
2.1.4 King Pin Inclination	12
2.1.5 Painopisteen määrittäminen	12
2.1.6 Kaarrekallistuman määrittäminen	15
2.1.7 Nyökkäys ja niiaus	17
2.1.8 Ominaisohjaus	17
2.1.9 Raideleveyden muutos joustoliikkeessä	18
2.2 Pyörän ja renkaan vaikutus ajettavuuteen	19
2.2.1 Renkaan rakenne	19
2.2.2 Renkaan sortokulma	20
2.2.3 Renkaan jousivakio	20
2.3 Heilahduksen vaimennuksen vaikutus ajettavuuteen	21
2.3.1 Kierrejousi	22
2.3.2 Heilahduksenvaimennin	24
2.3.3 Kaarrevakain	27
3 PYÖRÄTUENNAN UUSKONSTRUKTION SUUNNITTELU	28
3.1 Lähtökohdat	28
3.2 Mitat	28
3.3 Komponentit	29
3.3.1 Apurunko	29
3.3.2 Tukivarret	30

3.3.3 Aurauksensäätötanko	30
3.3.4 Heilahduksenvaimennin	31
3.3.5 Jousi	31
3.3.6 Pyörännapakonstruktio	31
3.3.7 Korin kaarrevakaaja	32
3.3.8 Nivelet	33
3.4 Kuormitukset	33
3.4.1 Staattiset kuormitukset ja momentit	33
3.4.2 Sivuttaisvoimat ja momentit kaarreaajossa	35
3.4.3 Tien epätasaisuudesta aiheutuvat voimat ja momentit	39
3.4.4 Jarrutuksen aiheuttamat voimat ja momentit	39
3.5 Konstruktio	47
3.5.1 Materiaalit	47
3.5.2 FEM –analyysit	52
4 YHTEENVETO	60
LÄHTEET	62
LIITTEET	
Liite 1 Lähtötietomuistio	
Liite 2 Työpiirustukset	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä on esitelty Oulun ammattikorkeakoulun auto- ja kuljetustekniikan oppilaiden aloittaman ST-Audi-projektin yhtä osaprojektia. ST-Audi-projektissa muokataan tavallinen Audi A1 -henkilöauto rata-ajoneuvoksi turvalaitteistoa, voimansiirtoa ja pyörätuenta muuttamalla. (Liite 1.) Ajoneuvon tehdasvalmisteiset heilahduksen vaimentimet ja pyörätuenta taka-akselilla ovat riittämättömät rata-ajoon. Tämän vuoksi on tarpeellista suunnitella ne uudelleen. Pyörätuentarakenteita on useita erilaisia, mutta kahdella kolmiotukivarrella varustettu tuntui järkevimmältä vaihtoehdolta ja helpoimmalta suunnitella. (Liite 2.)

Työn tavoitteena on luoda suunnitelma uudesta taka-akselin pyörätuennasta myöhempää toteutusta varten. Pyörätuennan uuskonstruktio tuli suunnitella siten, ettei ajoneuvon runkorakenteita tarvitsisi leikata tai hitsata. Rakenteiden tuli olla riittävän yksinkertaisia, jotta ne olisi helppo tarvittaessa valmistaa. Ennen kaikkea rakenteen tuli olla tarpeeksi kestävä, mikä tekisi siitä turvallisen käyttää ajoneuvossa. Rakenteen modulaarisuutta tuli myös ajatella suunnittelussa. Esimerkiksi voimansiirtoa muutettaessa nelivetoiseksi voisi työssä suunniteltua jousitusta ja pyörätuenta käyttä joka tapauksessa.

Opinnäytetyö on rajattu taka-akselin pyörätuennan ja jousituksen uudelleen suunnitteluun. Työssä on selvitetty mitoitusvaatimukset taka-akselin jousitus- ja pyörätuentarakenteille. Suunnittelussa on määritetty myös materiaalivalinnat rakenteen eri osille, kuten olka-akselin alumiinilaadun valinta, tukivarsissa käytettävien putkien materiaali ja profiilikoko sekä halvempien teräslaatuja soveltaminen pienemmän rasituksen vastaanottavissa rakenteissa.

2 AJO-OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

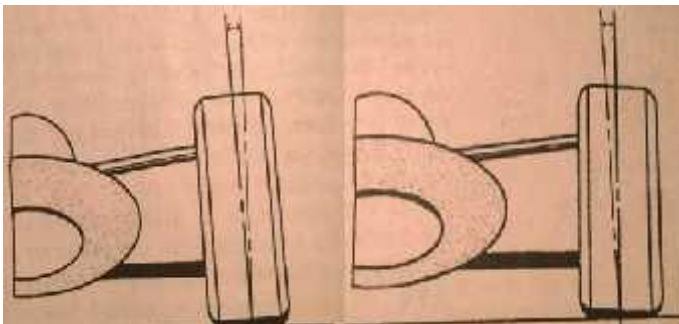
Tässä luvussa perehdytään keskeisiin ajoneuvon ajo-ominaisuuksiin vaikuttaviin tekijöihin. Auton ajokäyttäytymiseen vaikuttavat useat tekijät ajoneuvon painojakaumasta renkaan ominaisuuksiin. Kilpa-auton alusta rakennuksessa alustan ominaisuuksilta haetaan maksimaalista pitoa kaarreaajossa. Toisin sanoen parempi pito kaarteissa parantaa suoranopeuksia ja kierrosaika paranee.

2.1 Pyöräkulmien vaikutus ajettavuuteen

Taka-akselin pyöräkulmien säätöparametrit ovat keskeisiä auton ohjauskäyttäytymisessä etenkin kaarreaajossa. Kaarreaajossa pyöräkulmien muutos, asemapoikkeama normaalista ja kosketuspinta renkaan ja tien välillä pyritään pitämään mahdollisimman hyvänä. Nämä tekijät tulee ottaa huomioon ajoneuvon jousitusta suunniteltaessa.

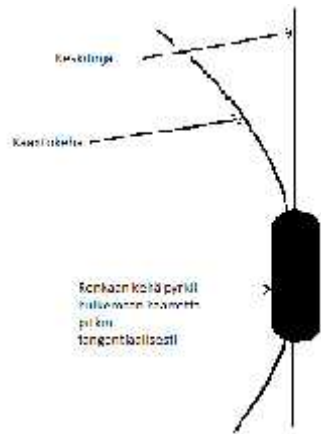
2.1.1 Camber

Camber-kulman vaikutus kaarreajo-ominaisuuksiin on yksi merkittävimpiä. Terminä camber tarkoittaa pyörän sivukallistumaa pystyakseliin z nähden. Camber voi olla negatiivinen tai positiivinen. Positiivisella camber-kulmalla pyörän yläpinta kallistuu ulospäin pystyakselista z , negatiivisella kulmalla kallistuma suuntautuu pystyakselin sisäpuolelle (kuva 1). (1, s. 6.)



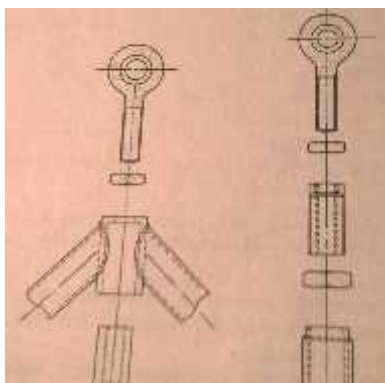
KUVA 1. Positiivinen ja negatiivinen camber-kulma (1, s. 6)

Camber-kallistuma aiheuttaa sivuvoimaa, jolloin rengas pyrkii kääntymään samaan suuntaan camber-kulman kanssa (kuva 2). Camber-kulmat tulisikin säätää siten, että normaaliajossa pienellä kuormalla pyöräkosketus olisi hyvä eli rengas olisi täysin pystysuorassa. (1, s. 7, 8.)



KUVA 2. Renkaan kaartuminen camber-kulman vaikutuksesta (2, linkit Articles- > Camber thrust, and how tyres work)

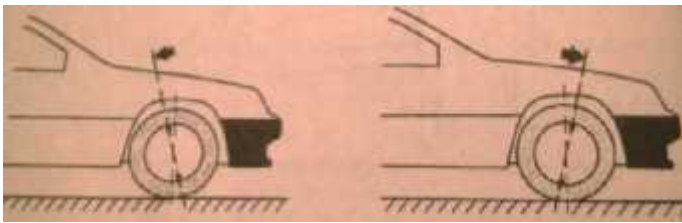
Kaarrajo ominaisuuksien kannalta parempi olisi kuitenkin säätää camber-kulmat siten, että ulkokaarteiden puoleinen rengas olisi pystysuorassa kaarteissa ajettaessa mahdollisimman pidon takaamiseksi. (1, s. 9) Rata-ajoneuvossa camber-kulmat ovat säädettävät, minkä vuoksi auton nivellyksessä tulee olla säätöominaisuus. Tämä tulee ottaa huomioon tukivarsia ja niveliä suunniteltaessa (kuva 3).



KUVA 3. Säädettävä tukivarren pallonivel (1, s. 10)

2.1.2 Caster

Caster-kulma on yksi keskeisimmistä auton kulkuvakauteen vaikuttavista säätöparametreista. Caster-kulmalla tarkoitetaan olka-akselin kallistumaa pystyakseliin nähden tai monitukivarsipyörätuennassa ylä- ja alapallonivelen. Kilpaajoneuvoissa yleensä on caster-kulman säätö, mutta tyypillisesti vain ohjaavalla akselilla. Kyseinen kulma voi olla positiivinen tai negatiivinen, mikä voidaan todeta kuvasta 4. (1, s. 14.)



KUVA 4. Positiivinen ja negatiivinen caster-kulma (1, s. 14)

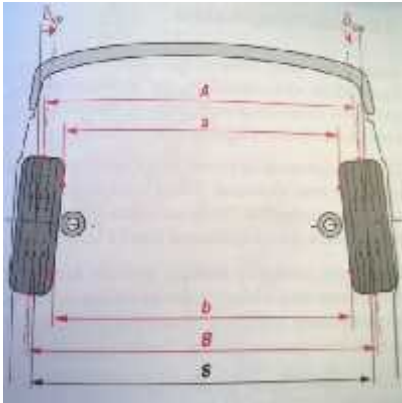
Positiivisessa caster-kulmassa olkatappilinjan yläpää kallistuu taaksepäin ja negatiivisessa eteenpäin ajoneuvon mukaisesti. Positiivinen caster-kulma saa aikaan auton ohjauspyörään keskittävän voiman, jolloin se pyrkii palaamaan 0-asemaan (1, s. 16). Tämä saa aikaan hyvän ohjaustuntuman, mutta kasvattaa tarvittavaa ohjausvoimaa.

Negatiivisella caster-kulmalla saadaan aikaan kevyt ohjaus, mutta suuremmilla nopeuksilla on vaikea saada auto kulkemaan vakaasti (1, s. 16). Tämä johtaa ilmiöön, joka on tuttu renkaiden harituksesta, jossa renkaat pyrkivät "hakemaan" ja ohjauksesta tulee hyvin epävakaa.

Rata-ajoneuvoissa caster-kulmat voivat olla erisuuret jokaisella pyörällä ja ne säädetään yleensä radan profiiliin mukaisesti. Tällä saadaan optimaalinen ajokäyttäytyminen ratakohtaisesti. Erisuuret caster-kulmat samalla akselilla saavat kuitenkin aikaan ohjausvoiman kasvun isomman kulman suuntaan kääntäessä sekä ohjauksen puoltamisen myös suoraan ajettaessa. (1, s. 17.)

2.1.3 Toe eli aurauskulma

Aurauskulmalla tarkoitetaan samalla akselilla olevien pyörien välistä kulmaa suhteessa pituusnormaaliin. "Aurauksella" tarkoitetaan yleensä renkaan etupuolien sisäänpäin kääntymistä ja "harituksella" renkaan etupuolien ulospäin kääntymistä auton keskiakselista (kuva 5). Yksikkönä aurausta voidaan ilmoittaa kulmana ja pituutena. (5, s. 251.)



KUVA 5. Aurauskulman määrittämiseen tarvittavat mitat (5, s. 251)

Aurauskulman säädön kannalta olennaista on myös renkaan kääntösäteen suuntaisuus offset, koska se kasvattaa myös sivuttaisvoimaa, jolloin rengas pyrkii liikkumaan sivusuunnassa autosta sisään tai ulospäin. Offset voi olla positiivista tai negatiivista. Auraus lisää kitkavastusta renkaalla, mutta sillä voidaan kompensoida myös camber-kulman aiheuttamaa sivuttaisvoimaa. Tällöin jousituksen ja pyörätuennan niveliin kohdistuvat voimat pienenevät ja autosta saadaan kaarreominaisuuksiltaan parempi. Aurauskulma aiheuttaa aina renkaan liiallista kulumista. (1, s. 21.)

Pyöräkoon kasvattaminen lisää aurauskulman synnyttämää sivuttaismomenttia vaikka kulma pysyisikin samana. Tämä johtuu siitä, että pyöräkoon kasvaessa renkaiden etureunojen välinen etäisyys muuttuu. Muutos voidaan laskea kaavalla 1. (1, s. 24.)

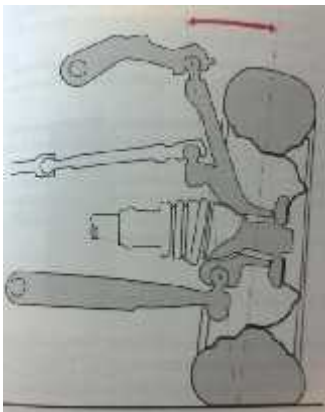
$$A_2 = A_1 \times \frac{\phi_2}{\phi_1}$$

KAAVA 1

A_1 = alkuperäinen auraus millimetreinä
 A_2 = muutoksen jälkeinen auraus millimetreinä
 \emptyset_1 = alkuperäinen renkaan koko
 \emptyset_2 = muutoksen jälkeinen renkaan koko

2.1.4 King Pin Inclination

Termillä king pin inclination (kuva 6) tarkoitetaan olkatapin sivukallistuskulmaa pyörän keskilinjaan nähden. Tämä kulma on hyvin keskeinen tekijä ajoneuvon kääntyvyyden kannalta. Olkatappilinja on nykyaikaisissa autoissa aina sisään-päin kääntynyt. KPI-kulmalla voidaan pienentää kääntämiseen tarvittavaa ohjausvoimaa ja täten pienentää ohjausvastetta tiestä ohjauspyörään. Toisin sanoen kääntösäteen lyhentyessä KPI kasvaa. (1, s. 18, 19.)

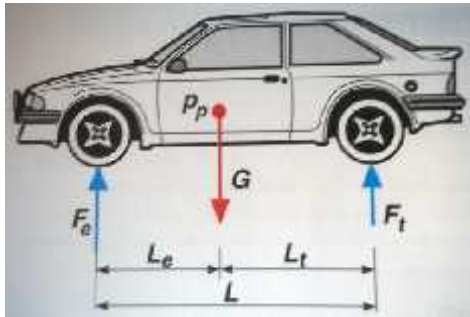


KUVA 6. Kääntösäteen sivukallistumakulma (5, s. 249)

KPI-kulmalla on kaarreaajossa hyvin samantapaiset vaikutukset ohjaustuntu-
maan kuin caster-kulmalla. Ohjaus pyrkii korin painon avulla keskittämään it-
sensä, millä on auton vakauden kannalta suuri merkitys.

2.1.5 Painopisteen määrittäminen

Painopiste (kuva 7) on hyvin olennainen asia ajoneuvon ajettavuuden kannalta. Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että matala painopiste takaa paremmat ajo-
ominaisuudet ajoneuvosta riippumatta.



KUVA 7. Painopisteen sijainti ajoneuvossa (5, s.120)

Painopisteen määrittämiseksi ajoneuvon pyöräkuormitukset tulee punnita vaa'olla. Painopiste voidaan pituus suunnassa määrittää akselimassojen ja akselivälin avulla kaavalla 2 (5, s. 120). Autodata-tietokannan mukaan ajoneuvon akseliväli on 2 469 millimetriä. Akseleiden pyöräkuormitukset on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Ajoneuvon pyöräkuormitukset

Pyörä	Vasen	Oikea
Etuakseli	371,0 kg	423,0 kg
Taka-akseli	197,5 kg	208,5 kg

$$L_x = \frac{m_{L_t}}{m_{L_e} + m_{L_t}} * L$$

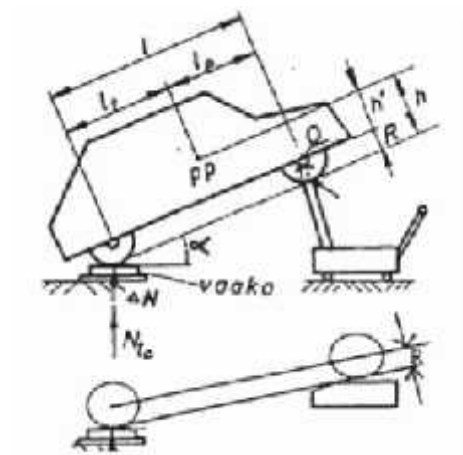
KAAVA 2

m_{etu} = etuakselimassa

m_{taka} = taka-akselimassa

L = akselivälin mitta

Kaavasta 2 saatu mitta L_x on massakeskipisteen etäisyys etuakselista taka-akseliin päin. Tämän jälkeen ajoneuvon toista päätä nostetaan ylemmäksi ja punnitaan uudestaan (kuva 8).



KUVA 8. Ajoneuvon painopisteen määrittäminen kallistamalla (6, s. 131)

Trigonometrian matemaattisten sääntöjen mukaisesti kallistuskulma voidaan laskea kaavalla 3, kun tiedetään nousun korkeus ja akseliväli.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_n}{L}\right) \quad \text{KAAVA 3}$$

h_{nosto} = nostokorkeus

Kuvan 8 mukaisesti suoritettua punnitsemista seuraten painopisteen korkeussuuntainen paikka etuakselin keskikohdasta saadaan laskemalla kaavalla 4 (5, s. 131), johon sijoitetaan kaavan 3 kallistuskulma, ajoneuvon yhteenlaskettu massa, kallistuksesta aiheutuva akselimassan muutos ja akselivälin mitta.

$$h' = \frac{L}{m} * \frac{\Delta m}{L} \alpha \quad \text{KAAVA 4}$$

m = akselimassan muutos

m = ajoneuvon massa

Kuvasta 8 voidaan todeta, että kaavasta 4 laskettuun mittaan täytyy lisätä renkaan dynaamisen vierintäsäde, jotta saadaan absoluuttinen painopisteen korkeus tienpinnasta (kaava 5).

$$h = h' + R_{dl}$$

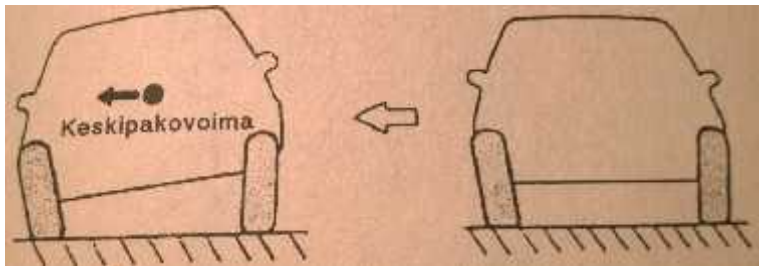
KAAVA 5

h' = painopisteen korkeus akselin keskikohdasta

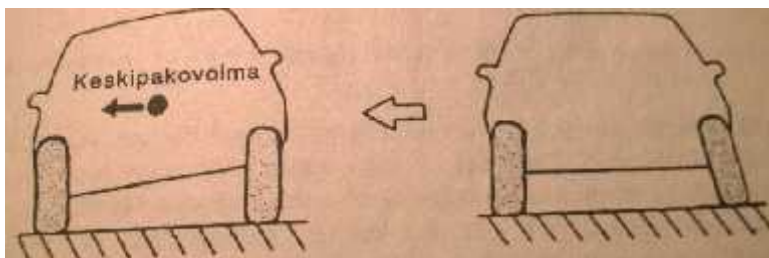
R_{dyn} = renkaan dynaaminen vierintäsäde

2.1.6 Kaarrekallistuman määrittäminen

Kaarrekallistuma tarkoittaa korin kallistumista auton alustaan nähden kaarteessa ajettaessa. Sillä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä akselikuormitusten muutokseen vaan huono ajettavuus tulee lähinnä painopisteen siirtymisestä ajoneuvon keskiakselista ulkokaarten puolelle. Pyörien camber-kulmien muutos aiheuttaa pidon heikkenemistä huonon pyöräkosketuksen vuoksi (1, s. 32). Huonontunutta pyöräkosketusta voidaan selkeyttää kuvilla 9 ja 10.



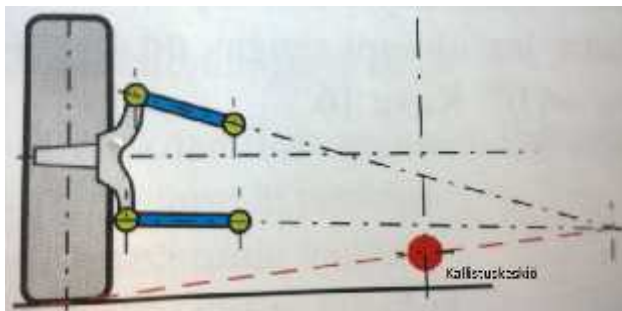
KUVA 9. Positiivisen camber-kulman vaikutus pyöräkosketukseen kaarreaajossa.(1, s.9)



KUVA 10. Negatiivisen camber-kulman vaikutus pyöräkosketukseen kaarreaajossa.(1, s.9)

Lisäksi äärimmäisissä tilanteissa heilahduksenvaimentimien jousto voi loppua kesken. Ongelmaa voidaan kuitenkin parantaa jousigeometriallla, heilahduksen vaimentimella ja kaarrevakaajalla, kuten luvussa 2.3 kerrotaan tarkemmin.

Pyörätuennan kallistumiseen vaikuttaa kallistuskeskiö, joka on tukivarsien ja renkaan alapinnan normaalien muodostama piste. Piste voidaan määrittää kummankin akselin kohdalle ja niiden välille vedetty viiva antaa kallistusakselin, jonka ympäri kori pyrkii kaarteessa kiertymään (kuva 11). Se, kuinka paljon tämän akselin yläpuolella painopiste sijaitsee, vaikuttaa auton korin kallistuspoikkeamaan siten, että suuri etäisyys näiden kahden pisteen välillä kasvattaa kallistusherkkyttä. (1, s. 33.) Voidaan siis ajatella, että painopisteen ja kallistuskeskiön välinen etäisyys toimii momentin vartena.



KUVA 11. Kallistuskeskiön määrittäminen ajoneuvossa (5, s. 76)

Ajoneuvon yli- ja aliohjautuvuutta voidaan parantaa auton alustan suunnitteluvaiheessa. Kallistuskeskiön ollessa auton etupäässä takapäätä kallistuskeskiötä korkeammalla pyrkii ajoneuvo aliohjautumaan. Aliohjautuvuus saadaan aikaan kallistuskeskiötä laskemalla ajoneuvon takapäätä. (1, s. 34.)

Kaarrekallistumassa tapahtuva painon siirto sisäkaarteeseen pyöriltä ulkokaarteeseen pyörille voidaan määrittää, kun tiedetään painopisteen korkeus, ajoneuvon massa, raideleveys ja sivuttaiskiihtyvyys (kaava 6). (1, s. 40.)

$$S = \frac{F \times h}{l} = \frac{m \times g \times h}{l}$$

KAAVA 6

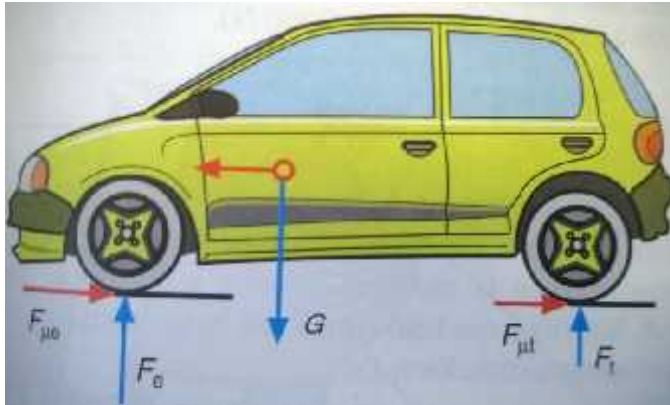
g = sivuttaiskiihtyvyys

l = raideleveys

m = ajoneuvon massa

2.1.7 Nyökkäys ja niiaus

Kuten kaarrekallistumassakin ajoneuvon massa pyrkii siirtymään nyökkäyskeskiön ympäri, joka on samanlainen käsite kuin kallistuskeskiö. Kiihdytyksen aikana ajoneuvon massa siirtyy enemmän takapyörille (kuva 12), jota kutsutaan niiaukseksi. Jarrutuksessa päinvastoin painoa siirtyy enemmän etupyörille ja tätä kutsutaan nyökkäykseksi. (1, s.41.)

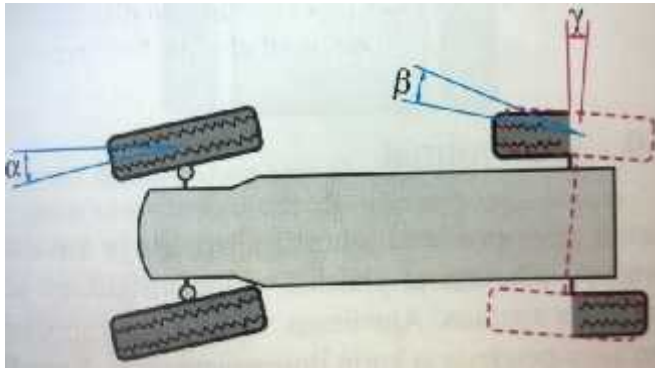


KUVA 12. Painonsiirtymä jarrutuksessa (5, s. 77)

Jarrutuksessa tapahtuva painonsiirron mukaisesti etuakselille kohdistuu merkittävästi suurempi kuorma kuin taka-akselille, mikä voidaan todeta kuvan 12 tukivoimien F_e ja F_t keskinäisestä kokosuhteesta. Tästä johtuen etuakselin pyörätuenta ja iskunvaimennus on mitoitettu huomattavasti suuremmaksi kuin taka-akselilla.

2.1.8 Ominaisohjaus

Kaarreaajossa monivarsituennalle on ominaista, että pyörän aurauskulmat pyrkivät muuttumaan jousitusgeometrian sisään- ja ulosjouston aikana (kuva 13). Ohjausliike tulee olla mahdollisimman pieni, koska se vaikuttaa ajoneuvon kaarrekäyttäytymiseen hyvin paljon. Kun ulkokaarten puoleinen pyörä kääntyy auraavaan suuntaan, syntyy aliohjausta ja harittavaan suuntaan kääntymisellä saadaan aikaan yliohtautumista. (1, s. 80, 81.)

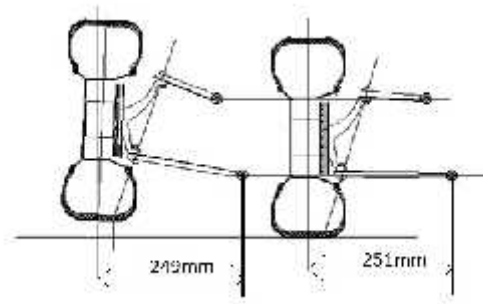


KUVA 13. Jousitusgeometrian aikaansaama, takapyöriä kääntävä vaikutus (5, s. 123)

Kuvassa 13 suure α tarkoittaa etupyörien sortokulmaa, β tarkoittaa takapyörien sortokulmaa ja γ on jousitusgeometrian aikaan saama aurauskulman muutos. Ajoneuvon taka-akselin ominaisohjausta käytetään yleisesti ajoneuvon kääntymisominaisuuksien parantamiseen. Painonsiirtymän vuoksi ulomman pyörän ominaisohjaus on ratkaiseva auton ali- tai yliohtautuvuuden aikaansaamiseksi.

2.1.9 Raidelevyden muutos joustoliikkeessä

Ajoneuvon alustan sisään- ja ulosjouston seurauksena usealla tukivarrella varustetulle pyörätuennalle on ominaista raidelevyden muuttuminen (kuva 14). Raideleveys kapenee sisään ja ulosjouston aikana. Leveimmillään raideleveys on kun auton alustaan ei staattisen pyöräkuorman lisäksi vaikuta mikään muu voima, eli auto on 0-asemassa. Mikäli opinnäytetyön ajoneuvo olisi neli- tai takavetoinen, täytyisi raideleveys huomioida tarkasti alustan suunnittelussa, jotta vetoakselit eivät joutuisi liian suurelle vetorasitukselle tai etteivät ne rajoittaisi vapaata joustoliikettä.



KUVA 14. Raideleveyden muuttuminen joustoliikkeen aikana (7, muokattu 1.10.2015)

2.2 Pyörän ja renkaan vaikutus ajettavuuteen

Kaarreaajossa ja epätasaisella pinnalla ajettaessa voimat ja momentit välittyvät autoon renkaiden ja pyörien välityksellä. Renkaan ominaisuudet korostuvat kun ajoneuvolle haetaan haluttuja ajo-ominaisuuksia. Renkaan jäykkyys, profiili ja pyörä koko, sekä renkaan Offset-asema ovat kriittisiä tarkasteltaessa ajokäyt-täytymistä. Lisäksi rengas toimii ilmajousen tavoin, poistaen ylimääräistä vä-rinää ajoneuvon ja tien väliltä iskunvaimennuksen ohella. Voidaankin sanoa, että rengasvalinnalla on merkittävin vaikutus ajotuntumaan.

2.2.1 Renkaan rakenne

Rengas koostuu useista eri osa-alueista, joilla kaikilla on oma tehtävänsä. Ren-kaan kulutuspinnan uritus parantaa pitoa ja ehkäisee vesiliirron syntymistä. Renkaan sivu tukee rengasta, vaikuttaa renkaan jäykkyyteen ja kaarreajo-ominaisuuksiin. Renkaan teräskudokset vahvistavat renkaan jäykkyyttä, vaikut-tavat renkaan nopeusluokkaan ratkaisevasti sekä kuormalujuuteen. Reunavaije-ri estää renkaan jalkaosan laajenemisen ja pitää renkaan huuloksen kiinni van-teessa. Välikerros on kumikerros teräskudosten välillä ja kulutuspinnan välillä. Jalkaosa tiivistää renkaan ja vanteen väliset pinnat. Renkaan kudusrakenteen tehtävinä on välittää jarrutus- ja kiihdytysvoimat akselin ja tien välille, ottaa vas-taan sivuttaisvoimia, pitää renkaan muoto kaikissa ajotilanteissa sekä absorboi-

da pientä värinää ja iskuja. Kudoskerroksia voi olla useita, ja niitä sitoo kumikerros niiden välissä. (3, s. 165 ja 166.)

Renkaan kudosrakenteiden materiaalit ovat nykyään erikoisrenkaita lukuun ottamatta terästä. Erikoisrenkaiden kestävyyttä puhkeamisen varalta voi olla paranneltu esimerkiksi Kevlar-kankaalla. Renkaan kudosrakenteita on nykyään pääosin kolmea tyyppiä. Vyörenkaassa cord-kudokset kulkevat pääosin renkaan vierintäkehän suuntaisesti. Raskaassa kalustossa käytetty ristikudosrenkas on huomattavasti korkeammille kuormille suunniteltu. Ristikudosrenkaassa cord-langat kulkevat eri suuntiin joka kudoskerroksessa. Kolmas kudostyyppi on kahden edellisen kudostyyppin sekoitus. (3, s.169.)

2.2.2 Renkaan sortokulma

Kaarreaajossa pyöräkulmien muuttuessa renkaan asento kulkusuuntaan nähden muuttuu ja saa aikaan sivuttaisvoiman, joka aiheuttaa jatkuvan muodonmuutoksen renkaaseen. Tätä kulmaa renkaan suunnan ja ajoneuvon kulkusuunnan välillä sanotaan sortokulmaksi. Sortokulmalla on olemassa rengaskohtainen yläraja, jolloin vierintäpito katoaa renkaan ja tien välillä, mikä johtaa ajoneuvon hallinnan pettämiseen. Renkaan sivuttaisvoima on suuruudeltaan sama, mutta suunnaltaan päinvastainen ajoneuvon vaikuttavan keskipakoisvoiman kanssa (1, s. 133 - 135.). Renkaan kehittämä sivuttaisvoima siis ehkäisee ajoneuvon sivuluisuherkkyyttä ja se tarkoittaa käytännössä sitä, että jäykällä renkaalla ajettaessa sivuttaisvoiman aiheuttama pito katoaa helpommin.

2.2.3 Renkaan jousivakio

Renkaan voidaan ajatella olevan kaasujousi, jossa renkaan sisältämä paineistettu ilma toimii joustavana elementtinä renkaan pinnan ja vanteen välissä. Lisäksi tähän vaikuttaa renkaan rakenne ja jäykkyys. Nämä tekijät muodostavat renkaan joustavuuteen vaikuttavan suureen, jousivakion. Jousivakio voidaan laskea tiedetyn voiman ja puristuman avulla kaavalla 7 (4.).

$$k = \frac{F}{x}$$

KAAVA 7

F = rengasta kuormittava voima

x = renkaan puristuma

2.3 Heilahduksen vaimennuksen vaikutus ajettavuuteen

Heilahduksen vaimennuksen tarkoitus on vaimentaa ajoneuvon alustan ja korin välisiä värähtelyitä. Kun auton jousituksen asema poikkeaa töyssyn tai voiman vaikutuksesta, alkaa kori värähtelemään. Sopivalla taajuudella toistuvat voimat voivat vahvistaa värähtelyä, mikä on epämiellyttävää ja voi johtaa lopulta ajoneuvon hallinnan menetykseen. Ratkaisu on heilahduksenvaimennin, jolla pyritään vaimentamaan värähtelyn amplitudia ja jaksonaikaa. (3, s.130.)

Oikeanlaisella iskunvaimentimella ajoneuvon ajettavuuden kannalta on siis kriittinen merkitys. Kilpa-ajoneuvoissa käytetään yleisimmin coilover-heilahduksenvaimentimia, missä jousi on integroitu iskunvaimentimeen sen männänvarren ympärille (kuva 15). Coilover-iskunvaimennin säästää tilaa ja painoa, kun erillistä joustintukea ei tarvitse tehdä alustaan tai koriin pelkästään jouselle.



KUVA 15. Coilover-heilahduksenvaimennin

2.3.1 Kierrejousi

Ajoneuvokäytössä käytetään nykyään kierrejousia sen kevyen painon ja tilantarpeen vuoksi (kuva 16). Vanhemmissa henkilöautoissa ja raskaissa ajoneuvoissa käytetään lehtijousipakkaa (kuva 17).

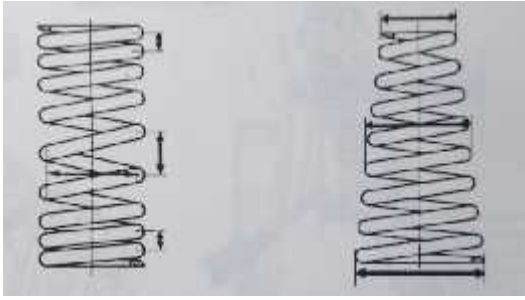


KUVA 16. Kierrejousi (8, linkit Products-> product-overview-> helical-compression-springs)



KUVA 17. Lineaarinen (yllä)- ja parabeelinen lehtijousi (9, linkit Technical-> Leaf Springs-> Spring Design)

Kierrejousi voi olla jousivakioltaan progressiivinen, degressiivinen tai lineaarinen. Lineaarisessa jousessa jousivakio pysyy samana (kuva 18) kun taas degressiivisessä ja progressiivisessä jousessa jousivakio muuttuu puristuman mukaan tiukemmaksi tai löysemmäksi, riippuen halutuista ominaisuuksista Progressiivisuus saadaan aikaan, kun jousilangan profiili ja kierteen nousu muuttuu koko jousen matkalla. Jousi voi olla myös tynnyrimäinen tai kartio, mikä aiheuttaa progressiivisuutta. (3, s. 45) Degressiivinen jousi on päinvastainen progressiiviseen nähden.



KUVA 18. Jousen progressiivisuuden toteutus kierteen profiilia ja kokoa muuttamalla (3, s. 119)

Lineaarijousen jousivakio voidaan määrittää helpoiten samaisella kaavalla kuin renkaan jousivakio määritetään (kaava 1). Degressiivisen tai progressiivisen jousen jousivakio voidaan laskea siten, että määritetään jousivakio useasta eri kohtaa jouta mittaamalla jousilangan halkaisija ja kierteen halkaisija samaisessa kohdassa (kaava 8). (4, s. 45.)

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n}$$

KAAVA 8

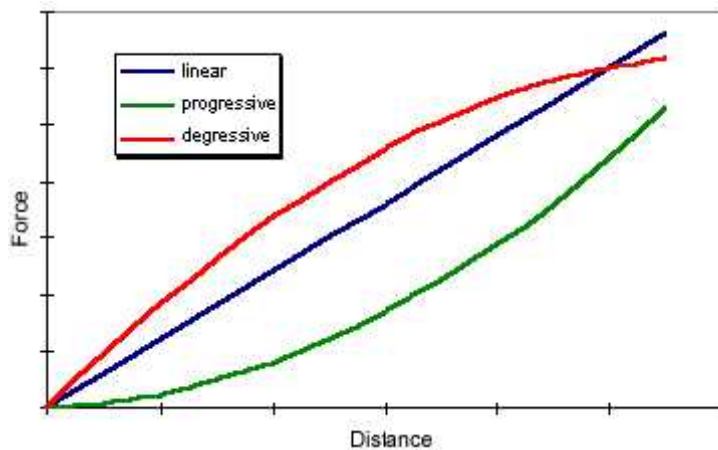
G = jousimateriaalin liukumoduuli

d = jousilangan halkaisija

D = jousen kierteen halkaisija

n = tehollisten kierteiden lkm

Jousivakiot voidaan sijoittaa kuvaajaan, jolloin pisteiden välille voidaan muodostaa kasvava käyrä (kuva 19).

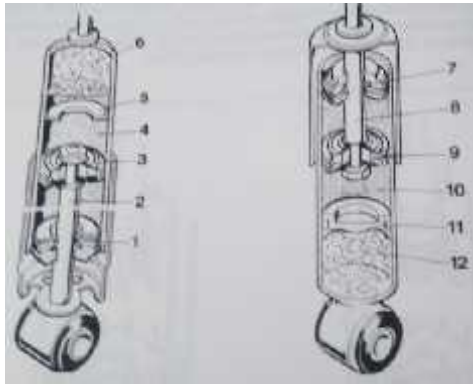


KUVA 19. Jousen puristusvoima jousen puristuman funktiona (10, linkit Theorie -> Theoretische Grundlagen Schwingmetall)

2.3.2 Heilahduksenvaimennin

Nykyisiin henkilöautoihin on saatavilla laaja valikoima tyypiltään ja toimintaperiaatteeltaan toisistaan poikkeavia iskunvaimentimia. Yleisin on nesteen virtausvastukseen perustuva nestevaimennin. Muita tyyppejä ovat kaasuvaimennin, kaasuvaimentimen ja nestevaimentimen sekoitus ja kitkavaimennin. Neste- ja kaasuvaimentimia on saatavilla yksi- (monotube) sekä kaksiputkisena (twintube) mallina. (4, s. 52 - 54.)

Yksiputkivaimentimen toiminnan kannalta olennainen kaasun erillään pitäminen vaimenninnesteestä toteutetaan joko erotusmännän tai kuristuslevyn avulla. Kuristuslevyvaimennin tulee asentaa aina kaasutilavuus ylöspäin, kun taas erotusmännällä varustettu voidaan asentaa ylösalaisinkin. Vaimennusvoimat syntyvät mäntäventtiileissä männän liikkeen mukaisesti. Yksiputkivaimentimen etuina kaksoisputkivaimentimeen nähden ovat alhaisempi hinta yksinkertaisen rakenteen vuoksi, parempi jäähtyvyys, eikä yksiputkivaimennin kavitoi niin herkästi kuin kaksiputkivaimennin. (3, s.131, 132.)

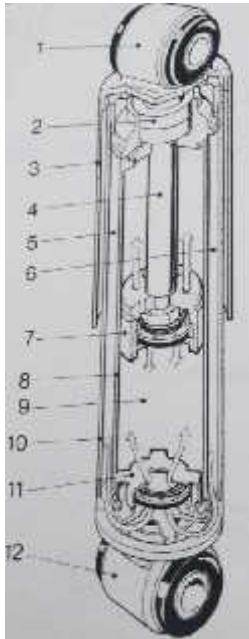


KUVA 20. Kuristuslevyllä (vasen) ja erotusmännällä (oikea) varustettu yksiputkivaimennin (3, s. 132)

Kuvassa 20 näkyvät numerot ovat iskunvaimentimen eri osia (3, s.132):

1. varsitiivisteet (7)
2. männän varsi (8)
3. mäntä ja mäntäventtiili (9)
4. työtila (10)
5. kuristuslevy (11)
6. kaasutila (12).

Twintube eli kaksoisputkivaimennin (kuva 21) koostuu kahdesta sisäkkäisestä putkesta, joita erottaa toisistaan pohjaventtiili. Mäntä liikkuu sisemmässä putkessa joustoliikkeen mukaisesti. Männän päässä on mäntäventtiili, joka rajoittaa nesteen virtausta männän ohi. Lisäksi pohjaventtiilillä voidaan rajoittaa öljyn virtausta. Ulkoputki toimii nesteverastona ja sisältää yleensä tilavuudeltaan kaksi kolmasosaa vaimenninöljyä. Vaimenninöljyn sisäinen kitka, joka syntyy venttiilien kuristaessa nestevirtausta, muuttaa heilahduksen lämpöenergiaksi, joten vaimennin voi lämmetä kovassa käytössä huomattavasti. (3, s. 130 ja 131)



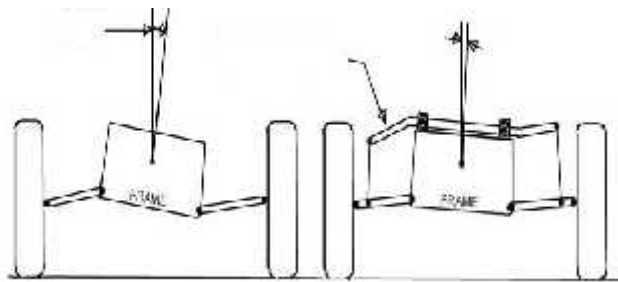
KUVA 21. Kaksoisputkivaimentimen läpileikkaus ja osat numeroituna (3. s,133)

Kuvassa 21 esitetyt numeroidut osat ovat seuraavat:

1. kiinnityssilmukka (12)
2. männänvarren tiivisteet
3. suojaputki
4. männän varsi
5. ulompi öljytila
6. paisuntatila
7. mäntä- ja mäntäventtiili
8. sisäputki
9. työtila
10. ulkoputki
11. pohjaventtiili.

2.3.3 Kaarrevakain

Kaarrevakaaja on vääntösauvajousi, jonka perimmäinen tarkoitus on jäykistää korin heilahtelua kaarreajossa. Kaarrevakaaja ei vaikuta iskunvaimentimien jousien jousijäykkyyteen, kun töyssy tai kuoppa sattuu molemmille saman akselin pyörille samanaikaisesti. Kun tien pinnan epätasaisuus osuu vain toiselle pyörälle, kaarrevakain pyrkii tasaamaan töyssystä aiheutunutta kallistusta nostamalla toisen puolen pyörää samaan suuntaan (kuva 22).



KUVA 22. Korin kallistuminen ilman ja kaarrevakaimen kanssa (11, linkit Forums-> NASIOC Technical-> Brakes, Steering & Suspension-> The OFFICIAL Swaybar & Endlink FAQ, muokattu 5.10.2015)

Vaimennusjäykkyyttä voidaan muuttaa säädettävillä koiranluilla ja portaattomalla kiinnityksellä vakaajan ja koiraluun välillä. Portaaton säätö muuttaa vääntövartta korikiinnityksen ja koiranluun välillä (kuva 23). (1, s. 37 - 39)



KUVA 23. Kaarrevakaimen säädettävä vääntövarsi ja säädettävä koiranluu (12, linkit Search-> porsche anti-roll bars 911-> Classic Porsche Anti-Roll Bars From EB Motorsport)

3 PYÖRÄTUENNAN UUSKONSTRUKTION SUUNNITTELU

Tutkittava auto on tehdasvalmisteinen, ja sen vuoksi siinä on yhdystukiakseli takajousituksena. Ajo-ominaisuuksiltaan tällainen yhdystukiakseli ei sovellu ratkäyttöön ollenkaan. Se aiheuttaa jatkuvaa aliohjautumista ja pidon huononemista takarenkailla kaarreaajossa. Tämän vuoksi autoon suunnitellaan uusi erillisjousitettu taka-akseli, jonka tarkoitus on parantaa ajokäyttäytymistä kilpajoneuvolle paremmin sopivaksi. Takajousituksen suunnittelussa käytettiin Dassault Systemes:n SolidWorks 3D-suunnitteluohjelmaa.

3.1 Lähtökohdat

Ajoneuvon runkogeometria asettaa haasteita jousituksen suunnitteluun. Siviili-automaiseen tapaan auton runkopalkit sijaitsevat taka-akselin kohdalla verrattain matalalla, mikä tulee ottaa huomioon apurunkoa ja tukivarsien kiinnityskoh-
tia silmällä pitäen, jotta kallisteluherkkyys saadaan minimoitua.

Tarkoituksena on suunnitella taka-akselin pyörätuenta kahdella kolmiotukivarrella ja aurauksensäätötangolla. Lisäksi kokonaisuutta jämäköittää coilover-tyyppinen heilahtelunvaimennin. Tukivarsien kiinnitys ei onnistuisi ilman erillisen apurungon tekoa ajoneuvon alle. Jotta apurungon sijoitus olisi yksinkertaista, täytyy käyttää kiinnittämiseen alkuperäisen yhdysheiluriakselin kiinnityksiä ja ajoneuvon omia runkokoteloita.

3.2 Mitat

Mitat suunniteltiin auton rungon mukaan, koska se rajoittaa voimakkaasti tukivarsien kiinnityspaikkoja ja pituuksia. Apurungon maksimileveys ei voinut ylittää 895 millimetriä, koska korin runkopalkit olivat tuolla etäisyydellä toisistaan. Ajoneuvon raideleveyttä voitiin hieman kasvattaa kallistusherkkyyden pienentämiseksi, joten se antoi hieman lisää pituutta tukivarsille. Komponenttien ja osien piirukset ovat liitteenä (liite 2). Koko jousituksen leveydeksi tulisi noin 1 500

mm, mikä on hieman leveämpi kuin alkuperäinen, mutta myös vakaampi kaar-
reajossa.

3.3 Komponentit

Tuotteen komponentit voidaan jakaa kahteen osaan, omavalmisteisiin ja valmii-
siin osiin, joiden yhteensovitus tapahtuu pääosin mittaamalla erinäisillä mittaus-
työkaluilla. Mittaustyökaluina käytettiin pääosin työntömittaa, millimetrimittaa
sekä Zeissin valmistamaa 3D-mittalaitetta, joiden tarkkuuksien katsottiin olevan
riittävät.

3.3.1 Apurunko

Apurungon kiinnitys ajoneuvoon tulee olla värinätön, joten sen kiinnityspisteisiin
tulee luoda värinän vaimennus puslilla. Apurunko (kuva 24) muodostaa puuttu-
van linkin pyörätuennan ja ajoneuvon rungon välille. Apurungon jäykkyys on
tärkeää, jotta se ei taivu ajon aikana, eivätkä pyöräkulmat muutu liian paljon.
Apurunko on helpoin tehdä putkimateriaalista. Tämä takaa myös kevyen pai-
non, mikä on tärkeää, jotta ajoneuvon paino ei nousisi. Lisäksi tukivarsien pi-
tuus ja kiinnitys riippuvat hyvin pitkälti apurungon geometriasta. Apurungon put-
kena käytetään tuuman eli 25,4 mm halkaisijan ja noin 32–33 mm halkaisija-
mitan putkea tukivarsien kiinnityspisteissä. Molempien seinämä vahvuus on yli
2 mm.



KUVA 24. Apurunko

3.3.2 Tukivarret

Tukivarsikonstruktioksi muodostui alkuperäisen suunnitelman mukaisesti kaksi kolmiotukivartta ja aurauksensäästövarsi. Lisäjäykkyys saatiin kaarrevakaajalla. Tukivarsien tulee olla riittävän jämäkät, jotta ne eivät taipuiliisi liiallisesti rasisuk- sessa tai hajoaisi ja aiheuttaisi onnettomuutta. Ala- ja ylätukivarsi (kuvat 25 ja 26) valmistetaan 25,4 mm paksuisesta putkesta, jonka seinämävahvuus on 2 mm tai enemmän.



KUVA 25. Ylätukivarsi



KUVA 26. Alatukivarsi

3.3.3 Aurauksensääötötanko

Alumiininen aurauksensääötötanko (kuva 27) pienentää jousittamattoman mas- san vaikutusta alustan toimintaan. Aurauksensääötötanko voidaan valmistaa noin 22 - 23 mm halkaisijan putkesta, jonka seinämävahvuus on 1 – 1,5 mm. Tangon tehtävänä on säilyttää pyöräkulmat muuttumattomana ajon aikana. Au- rauksensääötötanko muodostuu omavalmisteisesta tanko-osasta, joihin hitsataan

kierreholkit kumpaankin päähän. Kierreholkkeihin ruuvataan pallonivelet paikoilleen.



KUVA 27. Aurauksensäätötanko

3.3.4 Heilahduksenvaimennin

Opinnäytetyön iskunvaimentimet tilattiin alihankintana Bigem Oy:ltä mittatilaustyönä. Yritys valmisti iskunvaimentimet ajoneuvon mittojen mukaisesti. Iskunvaimentimet ovat täysin säädettävät ajoneuvon korkeuden ja vaimennuksen sekä ajoradan ja olosuhteiden mukaan. Mitoitukseen yritys oli käyttänyt kriittisen vaimennuksen periaatetta.

3.3.5 Jousi

Jousien valinta tapahtui laskemalla tarvittavat laskut, jotta voitiin varmistua jousien olevan riittävän pitkiä, tarpeeksi jäykkiä sekä ominaisuuksiltaan muutenkin riittäviä vaatimaan ajoon. Jouset on suunniteltu tilattavaksi Bayermann Oy:ltä, joka maahantuo H&R Special Springs -jousia.

3.3.6 Pyörännapakonstruktio

Pyörän napa-kokoonpanossa (kuva 28) käytetään auton alkuperäistä jarrusylinteriä, jarrulevyä, napa-akselia ja pyöränlaakeria. Nämä osat kiinnittyvät alumiiniseen olka-akseliin, joka koostuu kahdesta osasta. Alkuperäisistä osista luodaan 3D-mallit, joiden pohjalle olka-akselin 3D-mallin yhteensopivuus perustuu. Olka-akselissa tulee olla lievä KPI-kulma, jotta ajettavuus on vakaampi. Lisäksi

Motecin tiedonkeruujärjestelmää varten napalaakerin ympärille täytyy tehdä erillinen hammaskehä, jonka pyörintänopeustiedon lukee Hall-anturi.



KUVA 28. Pyörän napakonstruktio

3.3.7 Korin kaarrevakaaja

Kaarrevakaajan (kuva 29) tulee olla helposti jäykkyysäädettävä. Tämän vuoksi kaarrevakaajan vääntövarsiin tehdään useampi kiinnityskohta säädettäville yhdystangoille. Kaarrevakaajan putkimateriaaliksi sopii normaali teräsputki, jonka paksuus on 22,1 mm ja seinämävahvuus 1,5 mm. Kaarrevakaajan kokoonpano koostuu vakaajatangosta, parista vääntövarresta, kahdesta holkista, kahdesta yhdystangosta ja kahdesta kiinnikkeestä.



KUVA 29. Kaarrevakain

3.3.8 Nivelet

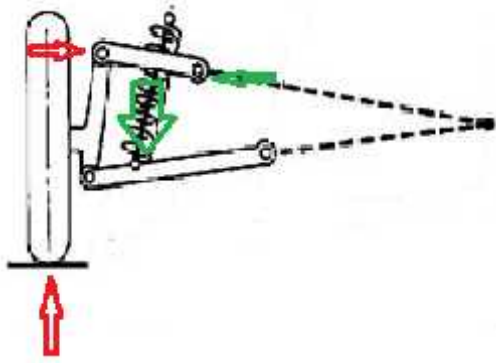
Pyörän tuennan sauvarakenteet tuetaan koriin kiinnitettävään apurunkoon holkkikonstruktiolla. Sauvarakenteet kiinnitetään pyörän napakonstruktion pallonivelillä. Pallonivelet ovat valmiina hankittavia osia. Palloniveltuenta nähdään paremmin liitteenä olevasta pyörätuennan kokoonpanopiirustuksesta (liite 2).

3.4 Kuormitukset

Ajoneuvon alustaan kohdistuu ajon aikana staattisia ja dynaamisia kuormituksia. Staattiset kuormat ovat koko ajan läsnä ajoneuvon kaikissa ajotilanteissa. Dynaamiset kuormitukset ovat yksittäisistä toistuvista voimista aiheutuvia kuormituksia. Jarrutus aiheuttaa pyörätuentaan vetoa, puristusta ja vääntöä moneen suuntaan. Lisäksi tieherätteet kuormittavat jousitusta epätasaisesti ja toistuvasti ajon aikana, minkä vuoksi niiden vaikutus tulee laskea. Lasketut kuormitukset sijoitetaan Solidworksilla tehtävään FEM-analyysiin, jonka tarkoituksena on varmistaa suunnitellun rakenteen kestävyys kaikkien kuormitusten vaikutuksen alaisena. Kuormitusten laskemisessa käytetään apuna valmiiksi laadittuja 3D-malleja.

3.4.1 Staattiset kuormitukset ja momentit

Staattisessa kuormituksessa ajoneuvon oma massa aiheuttaa voimia tukivarsille ja nivelille. Erityisesti alatukivarsi joutuu tässä tilanteessa ottamaan vastaan suurimman osan voimasta pystysuunnassa. Ylätukivarteen kohdistuu puristusta renkaan toimiessa vääntövirtana alapallonivelen ympäri riippuen camber- ja KPI-kulmista.



KUVA 30. Staattinen pyöräkuorma ja sen aiheuttamat voimat (13, linkit The Car Tech (Technical Notes and Calculations) in English-> Automobile Suspensions, muokattu 11.3.2015)

Kuormitus voidaan laskea jokaiselle pyörälle erikseen, kun jokaisen pyörän pyöräkuormitukset punnitaan vaa'alla. Tämän jälkeen punnitustulos muutetaan voiman yksikköön newton (N) kaavalla 9.

$$F = m \times g$$

KAAVA 9

m = pyöräkuormitus vaa'an mukaan (kg)

g = vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys (9,81 m/s²)

Tästä saadaan molemmille takapyörille pyöräkuormat Excel-taulukkolaskentaohjelmalla laskemalla (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Takapyöräkuormat

Vasen	Oikea
1937,48	2045,39

3.4.2 Sivuttaisvoimat ja momentit kaarreaajossa

Kaarreaajossa ajoneuvon renkaan ja tien välinen kitka synnyttää sivuttaisvoiman, joka saa aikaan ajoneuvon pysymisen kaarteessa. Äärimmäinen sivuttaisvoima syntyy, kun ajoneuvon massan aiheuttama ulospäin työntävä voima ja kitkan aiheuttama sivuttaisvoima ovat tasapainossa. Tasapainotilanteessa voidaan määrittää suurin sallittu nopeus, jolla ajoneuvo voi liikkua tietyllä kaarteiden säteellä. Koska keskeiskiihtyvyys täytyy olla tässä tapauksessa yhtä suuri kuin vetovoimakiihtyvyys, käytetään sitä myös keskeiskiihtyvyyden arvona. Kitkakerroin on kuivan asfaltin ja renkaan välillä 0,8 (kaava 10).

$$v_t = \sqrt{\mu r g}$$

KAAVA 10

μ = kitkakerroin

g = vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys

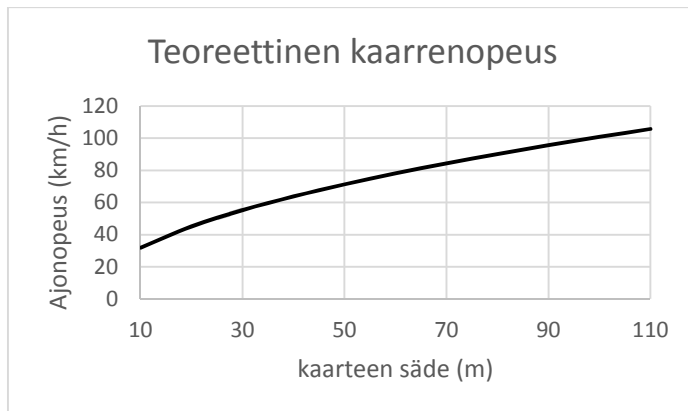
r = kaarteiden säde

Kun sijoitetaan muutamia kaarteiden säde arvoja kaavaan Excelissä, saadaan niille teoreettiset suurimmat ajonopeudet taulukkomuodossa (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Teoreettiset suurimmat kaarreajonopeudet kaarteiden säteen funktiona

kaarteiden säde (m)	maksimi nopeus (km/h)
30	55,2385952
40	63,78403562
50	71,31271976
60	78,1191705
70	84,37834793
80	90,20424824
90	95,67605343
100	100,8514155
110	105,7738569

Arvot voidaan muodostaa diagrammiksi, joka auttaa paremmin ymmärtämään kaarteiden säteen ja ajonopeuden välistä riippuvuutta (kuva 31).



KUVA 31. Teoreettiset kaarrehuippunopeudet kaarteiden säteen funktiona

Taka-akselille kohdistuva sivuttaisvoima saadaan kun lasketaan kunkin taulukon 3 pisteelle omat sivuttaisvoima-arvot. Tämän jälkeen ajoneuvon massan arvo sijoitetaan kaavaan 11. Laskut lasketaan usealla eri kaarteiden säteellä ja sille kuuluvalla teoreettisella maksimi ajonopeudella.

$$F_{\mu} = ma_n$$

KAAVA 11

Johdetaan kaava laskettavampaan muotoon ja lasketaan kitkavoiman arvo.

$$F_{\mu} = mv^2/r$$

m = ajoneuvon massa

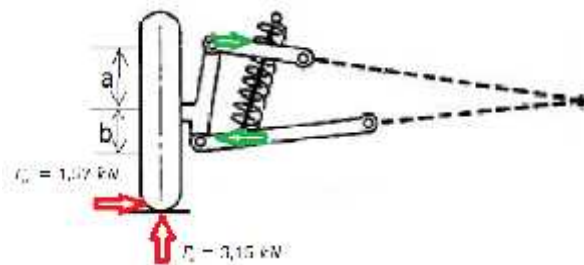
v = ajoneuvon nopeus (m/s)

r = kaarteiden säde

Kaavasta 11 huomataan, että kaarteiden säteellä ei ole merkitystä, kun ajoneuvo liikkuu kaarteiden läpi kaarteelle lasketulla teoreettisella kaarreajonopeuden maksimilla. Tulokseksi saadaan $F_{\mu} = 3,56$ kN suuruinen kitkavoima.

On huomioitava tässäkin kaarrekallistuma aiheuttama akselikohtainen painojako, joka on riippuvainen kaarrevakaajan ja iskunvaimentimien jousien jousivaki-

osta. Jäykkä jousitus välittää enemmän voimaa sisäkaarteeseen puoleiselle takapyörälle, jolloin pito säilyy tasaisempana pyörien välillä, kun painosiirtymä ei ole niin suuri kuin löysemmän jousivakion omaavalla kaarrevakaajan ja iskunvaimentajan jousella. Kun auton painojakauma etu- ja taka-akselin välillä on 64/36, saadaan takapyörien pyöräkohtaiseksi sivuttaisvoimaksi $F_s = 1,78 \text{ kN}$. Äärimmäisissä tilanteissa sisäkaarteeseen puoleisen takapyörän kosketus tiehen voi olla todella pieni, jolloin sen kehittämä sivuttaiskitkavoima on pieni. Käytetään lujuusanalyysiä varten laskuissa varmuuskerrointa 2. Lujuusanalyysissä tukivarsia kuormittavan voiman suuruus, kun se kerrotaan varmuuskertoimella, on $F_s = 3,56 \text{ kN}$, ja jonka otaksutaan kohdistuvan ylätukivarteen vetokuormitukseksi (kuva 32).



KUVA 32. Sivuttaiskitkavoiman aiheuttama veto ja puristus tukivarsissa (13, linkit *The Car Tech (Technical Notes and Calculations) in English-> Automobile Suspensions*, muokattu 11.3.2015))

On otettava huomioon kaarrekallistuman aiheuttama muutos pyöräkuormitusten määrityksessä, koska auton oma massa aiheuttaa kuormitusta heilahdusakselin ympäri. Tämän vuoksi tulee laskea painonsiirtymän aiheuttama rengaskuormitus (kaava 12), joten todellinen rengaskuormitus muodostuu staattisesta kuormituksesta ja painonsiirtymän aiheuttamasta kuormituksesta taka-akselilla painojakauman mukaisesti (64/36). Staattisena pyöräkuormituksena voitaneen käyttää takarenkaan pyöräkuormaa. Kaavassa 12 yhdistetään kaava 6 ja vasemman takapyörän staattinen kuormitus F_s .

$$N_k = S + F_s$$

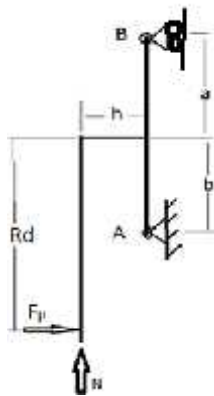
KAAVA 12

Sijoitetaan kaavat 6 kaavaan 12 ja tehdään laskun ymmärtäminen helpommaksi:

$$N_K = \left(\frac{m \times g \times h}{L} \times 0,36 \right) + F_S.$$

Kaarreajon pyöräkuormitukseksi saadaan tällä kaavalla noin 3,84 kN, mikä tuplataan varmuuskertoimen vuoksi eli $N_{kaarre} = 7,68$ kN.

Oлка-akselin lujuus analysoidaan Solidworksilla staattisesti ja dynaamisesti käyttäen edellä laskettuja arvoja. Tukivarsien lujuusanalyysiä varten tulee laskea niihin kohdistuvat veto/puristus ja pystyvoimat. Helpoin tapa on laskea tukivarsien päihin kohdistuvat voimat, jotka voidaan edelleen syöttää Solidworksin FEM-analyysiin. Laskun ymmärtämisen helpottamiseksi laaditaan sauvamalli kaarreaiovoimatapauksesta (kuva 33).



KUVA 33. Pyörän olka-akselin lujuusanalyysissä sovellettu sauvamalli

Statiikan mitoitusperiaatteiden mukaisesti olkatapin nivelistä alapallonivel on jäykkä ja yläpallonivel sallii liikkeen pystysuunnassa. Jotta systeemi on tasapainossa, tulee pisteeseen A kohdistua pystysuuntainen voima A_y ja vaakavoima, joka on vetoa A_x sekä pisteeseen B vaakavoima B_x , joka on puristusta. Muodostetaan tasapainolausekkeet systeemille:

$$\uparrow : N - A_y = 0$$

$$\rightarrow : F_\mu - B_x + A_x = 0$$

$$\curvearrowright A : F_\mu \times (R_d - b) - N_K \times h + B_x \times (a + b) = 0.$$

Ratkaistaan momenttilausekkeesta B_x :

$$B_x = \frac{-F_{\mu} \times (R_d - b) + N_k}{(a + b)} \times h.$$

Voiman B_x ratkaisulausekkeessa dynaamisen vierintäsäätteen R_d mittana käytetään arvoa 278,85 mm. Mittana b eli alapallonivelen etäisyytenä pyörän keskiakselista käytetään arvoa 86,91 mm. Yläpallonivelen mitta pyörän keskiakselista eli mitta $a = 96,16$ mm. Mittana h käytetään 115,83 millimetriä.

Seuraavaksi ratkaistaan pystysuuntainen voima A_y pystyvoimalausekkeesta:

$$A_y = N_k.$$

Ratkaistaan alatukivarteen kohdistuva vaakavoima A_x vaakavoimalausekkeesta:

$$A_x = -F_{\mu} + B_x.$$

Laaditaan saaduista voimista taulukko, niiden suuruusluokan havainnollistamiseksi (taulukko 4). Tuloksiin on lisätty varmuuskerroin 2.

TAULUKKO 4. Lopputulokset voimiksi kaarreajon aikana

B_x	A_y	A_x
1,55 k	7,68 k	1,60 k

3.4.3 Tien epätasaisuudesta aiheutuvat voimat ja momentit

Tien epätasaisuus kuormittaa alustaa ajoneuvon vauhdin ja epätasaisen alustan profiilin mukaan. Tiessä olevat kuopat ja aiheuttavat rasisusta alustan niveliin ja tukivarsiin. Tienpinnan heräte oletetaan olevan sinimuotoista (4, s. 14).

$$F_{ch} = \sqrt{(k \times z_m)^2 \times (c \times \Omega \times z_m)^2}$$

KAAVA 13

Kaava 13 voidaan sieventää muotoon:

$$F_{ch} = z_m \sqrt{k^2 + (c\Omega)^2}.$$

Jotta voidaan laskea joustoliikkeen maksimikuorma, täytyy laskea maksimi amplitudi joustoliikkeelle kaavalla 14. (4, s. 19.)

$$z_m = \frac{F_m}{\sqrt{(k - m\Omega^2)^2 + (c\Omega)^2}} \quad \text{KAAVA 14}$$

k = iskunvaimentimen jousivakio

c = vaimennusvakio

Kaavassa 14 on ennalta ratkaisemattomia suureita, jotka voidaan laskea kaavoilla 15 ja 16. (4, s. 17 ja 18). Joustoliikkeen pakkovoima lasketaan kaavalla 15. Käytetään laskennassa jousivakiona arvoa 200 N/mm ja tien epätasaisuusmaksimina arvoa 0,1 metriä.

$$F_m = k_R \times z_R \quad \text{KAAVA 15}$$

k_R = jousivakion maksimiarvo

z_R = tien epätasaisuusmaksimi

Lasketaan tieherätteen ominaiskulmanopeus kaavalla 16. Käytetään laskussa ajonopeutena 190 km/h eli 52,78 m/s ja tien epätasaisuusjakson pituutena 2,0 metriä.

$$\Omega = 2\pi \times \frac{x}{L} \quad \text{KAAVA 16}$$

x = ajonopeus

L = tien epätasaisuusmaksimi

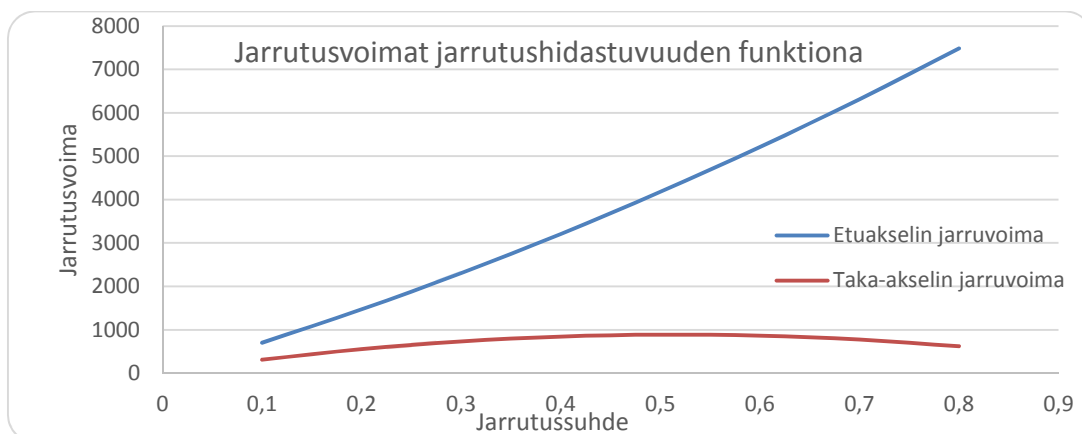
Kaavan 14 lopputuloksena tieheräte aiheuttaa ajoneuvon alustaan kohdistuvan noin 15,84 kN suuruisen hetkellisen voiman. Täytyy ottaa huomioon, että ajoneuvon alustaa suunnitellaan rata-ajoa silmällä pitäen ja tällaiset epätasaisuudet (0,1m) näillä ajonopeuksilla olisivat epärealistisia asfalttialustaisella kilparadalla. Mitoituksen kannalta kuitenkin on olennaista varautua kaikkeen mahdolliseen, jotta kuljettajan turvallisuus ja ajoneuvon hallinta ovat taattu.

3.4.4 Jarrutuksen aiheuttamat voimat ja momentit

Ajoneuvon jarrutuksessa rengas aiheuttaa pyörätuennalle taakse taivuttavan voiman ja eteenpäin kiertävän taivutusmomentin pyörän keskiakselin ympäri lukkiutumistilanteessa. Jarrutuksesta aiheutuvat voimat syntyvät, kun jarrupalat puristavat jarrulevyä molemmilta puolilta tasaisesti, minkä jälkeen auton oma kineettinen liike-energia pyrkii pyörittämään rengasta edelleen ja tämä aiheuttaa ylätukivarteen eteenpäin taivuttavan vaikutuksen ja alatukivarteen vastakkaisen suuntaisen taivutuksen. On huomioitava ajoneuvon rengaskoko, joka toimii vääntövirtana sekä tukivarsien nivellyksien etäisyys pyörän keskiakselista.

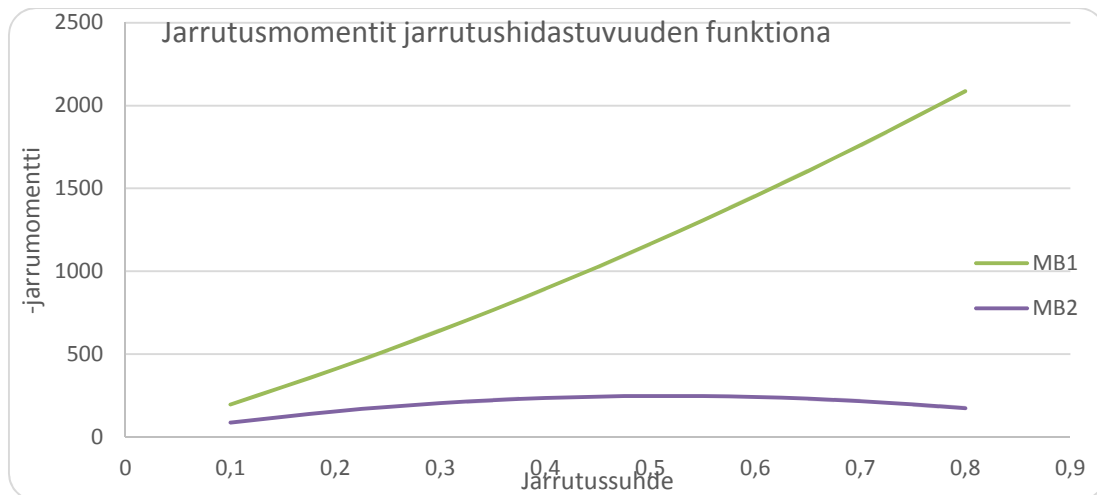
Jarruvoimien laskennassa käytetään Oulun ammattikorkeakoulun yliopettaja, professori Mauri Haatajan Autotekniikka 2 -kurssilla laadittua harjoitustyötä, joka laadittiin Excel-ohjelmalla (4). Harjoitustyössä syntynyt laskentaohjelma on minun ja opiskelutoveri Henri Mustajärven laatima, jota olen edelleen kehittänyt opinnäytetyön tarpeisiin. Harjoitustyössä laadittuihin Excel-taulukoihin muutetaan opinnäytetyön ajoneuvosta mitatut lähtöarvot. Näiden lähtöarvojen perusteella saadaan kummankin akselin jarruvoimien arvot eri jarrutussuhteilla $z = 0 \dots 0,8$ (kuva 34). Jarrutushidastuvuus z ilmaisee hidastuvuuden a suhdetta puotamiskiihtyvyyteen g .

Excel-taulukolla saadaan kullekin jarrutushidastuvuudelle vastaava etu- ja taka-akselin jarrutusvoima B_1 ja B_2 (kuva 34).



KUVA 34. Jarrutusvoimat jarrutushidastuvuuskertoimen funktiona

Kun kuvassa 34 näkyvät käyrät kerrotaan momentin vartena toimivalla dynaamisella vierintäsäteellä, saadaan akseliin kohdistuva jarrutusmomentti (kuva 35), jonka avulla voidaan laskea jarrutuksen aiheuttaman voiman kuormitus tukivarsiin. Saadut voimat syötetään FEM-analyysiin ja kappaleet tarkastellaan staattisen kuormituksen varalta sekä dynaamisesta kuormituksesta johtuvan metallin väsymisen varalta.



KUVA 35. Jarrutusmomentit jarrutushidastuvuuskertoimen funktiona

Kuvaajasta voidaan päätellä, että jarrutusmomentti on suurimmillaan kun jarrutussuhde $z = 0,55$, jolloin jarrutuksen aiheuttama vääntömomentti on olka-akselin keskipisteeseen $M = 123,84 \text{ Nm}$. Määritetään tukivarsiin kohdistuvat momentit kaavalla 17. (20, s. 93)

$$F = \frac{M}{r} \quad \text{KAAVA 17}$$

M = olka-akselin keskipisteeseen kohdistuva vääntömomentti

r = momentin varsi

Ylätukivarteen kohdistuvan voiman vartena r käytetään kuvan 32 (luku 3.4.1) mittaa **a**. Muotoillaan kaava 17 ylätukivarteen kohdistuvan voiman laskentaan paremmin ymmärrettävään muotoon.

$$F_{y\ddot{a}} = \frac{M}{a}$$

Alatukivarteen kohdistuvan voiman vartena käytetään kuvan 32 (luku 3.4.1) mittaa **b**. Muotoillaan kaava 17 alatukivarteen kohdistuvan voiman laskentaan.

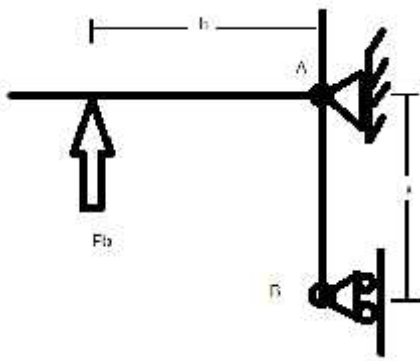
$$F_a = \frac{M}{b}$$

Tulokset voidaan esittää taulukkomuodossa niiden suuruuden havainnollistamiseksi (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Tukivarsille kohdistuvat voimat jarrutustilanteessa

$F_{y\ddot{a}}$	F_a
1,29k	1,43 k

Jarrutus aiheuttaa myös tukivarsiin taaksepäin taivuttavaa rasitusta sekä vetoa aurauksensäätötankoon. Tarkastellaan tilannetta sauvamallin avulla (kuva 36).



KUVA 36. Jarrutuksen aiheuttamat rasitukset pyörätuennalle ylhäältäpäin tarkasteltuna

Mallista voidaan päätellä nivelen A olevan kiinteä vaaka- ja pystysuunnassa (puristus ja taivutus), kun taas aurauksensäätötangon kiinnitysnivel B sallii liikkeen pystysuunnassa. Näin ollen niveleen b kohdistuu vain vetoa jarrutuksen aikana. Voima F_b saadaan kun tiedetään jarrutussuhde z ja massa, joka takapyörälle kohdistuu. Voidaan myös olettaa jarrutuksen tapahtuvan kaarteessa jolloin pyöräkuorma on suurempi painonsiirtymän vuoksi.

Lasketaan jarrutuksesta aiheutuva ajoneuvon kulkusuunnassa taaksepäin vetävä voima kaavalla 18 (20, s. 91).

$$F_b = m \times a$$

KAAVA 18

m = pyörälle kohdistuva massa kaarreaajossa

a = jarrutushidastuvuus

Kaavan 18 massan arvo ja ajoneuvon jarrutushidastuvuuden eivät ole tiedossa, joten niiden arvo täytyy määrittää (kaavat 19 ja 20) ennen sijoitusta kaavaan 18. Kaavan 19 laskennassa tarvitaan ajoneuvon kokonaismassa (taulukko 1), painojakauma, painopisteen korkeus ja akseliväli. Määritetään kaava 19, jolla voidaan laskea pyörään kohdistuva massa kaarreaajossa.

$$m = \frac{m_k \times F_w}{z} + \left(\frac{\frac{m_k \times F_w}{z} \times g \times h}{L} \div g \right)$$

KAAVA 19

m_{kok} = ajoneuvon kokonaismassa

R_w = ajoneuvon painojakauma

h = painopisteen korkeus

L = akseliväli

Kaavan 18 ratkaisemiseksi tulee määrittää jarrutushidastuvuus kaavalla 20 (4, s 31). Jarrutushidastuvuus on suoraan verrannollinen ajoneuvon jarrutussuhteeseen. Jarrutussuhteen arvona kaavan 20 laskussa voidaan käyttää arvoa 0,7. Lisäksi lopputulokseen tarvitaan luonnonvakio g .

$$a = z \cdot g$$

KAAVA 20

z = jarrutussuhde

g = vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys

Sijoitetaan kaavat 19 ja 20 kaavaan 18:

$$F_b = \left(\frac{m_k \times R_{Wz}}{z} + \left(\frac{m_k \times R_{Wz} \times h}{L} \right) \right) \times (z \times g).$$

Sijoituksen lopputuloksena laskun tuloksi saadaan $F_b = 2,02$ kN suuruinen pyörätuentaa taaksepäin vääntävä voima.

Tasapainolausekkeiden muodostamista varten tulee arvioida tukivoimat ja niiden suunnat, jotka kohdistuvat tukivarsien nivelpisteisiin (kuva 37). Jotta tasapainolauseke voidaan ylipäättään muodostaa, tulee jokaisella voimalla olla vastavoima ja systeemi tuleekin suunnitella niin, että kaikki voimat ja niiden suunnat arvioidaan oikein.



KUVA 37. Nivelpisteisiin kohdistuvat kuormitukset

Kuvassa 37 vaakasuuntainen voima A_x on taakse taivuttavan momentin aiheuttama raskaus olka-akseliin. Vaakasuuntainen voima B_x on aurauksensäätövarren kohdistuva vetovoima. Pystysuuntainen voima A_y on olka-akseliin kohdistuvan voiman F_b vastainen tukivoima. Lasketaan niveliin kohdistuvat voimat statiikan perusteiden avulla ja muodostetaan voimien ja momenttien tasapainolausekkeet:

$$\uparrow: F_b - A_y = 0$$

$$\rightarrow: -A_x + B_x = 0$$

$$\curvearrowright A: F_b \times h - B_x \times x = 0.$$

Tasapainolausekkeessa käytetään kuvassa 36 näkyviä mittoja, jotka ovat pyöränlaakerin etäisyys olka-akselista eli mitta h ja aurauksensäätövarren etäisyys olka-akselista eli mitta x . Mitan h arvona käytetään 77,05 mm ja x :n arvo on 115,83 mm. Ratkaistaan vaakasuuntainen voima B_x pisteen A vääntömomenttilausekkeesta:

$$B_x = \frac{F_b \times h}{x}.$$

Ratkaistaan puristusvoima A_x vaakasuuntaisten voimien lausekkeesta:

$$A_x = B_x.$$

Ratkaistaan tukivoima A_y pystysuuntaisten voimien lausekkeesta:

$$A_y = F_b.$$

Ratkaistujen voimien arvot esitetään taulukon muodossa, jotta niiden havainnollistaminen olisi selkeämpää (taulukko 6).

TAULUKKO 6. Jarrituksen aiheuttamat taakse taivuttavat voimat.

B_x	A_x	A_y
3,04 k	3,04 k	2,02 k

3.5 Konstruktio

Pyörätuenta koostuu apurungosta, ylä- ja alatukivarresta, aurauksensääötangosta, coilover-iskunvaimentimesta ja kaarrevakaimesta yhdystankoineen.

Apurungon kiinnityksessä käytetään hyväksi alkuperäisiä vääntösauvajousituksen kiinnityspisteitä. Ajoneuvon takaosaan valmistetaan runkopalkkiin sopivat takakiinnityspisteet apurungolle. Apurunko pyritään tekemään mahdollisimman kevyeksi, auton omaa runkogeometriaa myötäileväksi ja tilaa tulee jäädä sopivasti nelivedolle, mikäli sellainen autoon tulevaisuudessa rakennetaan.

Ylä- ja alatukivarret ovat kolmiotukivarsia ja ne ovat linjattuja siten, että pyöräkulmien camber-kulman muutos olisi mahdollisimman pieni. Tähän päästään muuttamalla alatukivarren pituutta ja kiinnityspistettä. Tutkiminen voidaan suorittaa Solidworksilla. Ylätukivarren kiinnityspisteen täytyy olla hyvin kiinteä, koska se tulee runkopalkin myötäisesti ja sen vuoksi sitä ei voi viedä lähemmäs auton keskilinjaa.

Aurauksensääötangosta pyritään tekemään säädettävä, jolloin ominaisohjausta voidaan muuttaa aurauksensääötangon ulkokiinnityspisteen etäisyyttä yläpalonivelestä siirtämällä.

3.5.1 Materiaalit

Putkimateriaaliksi on valittu yhteistyökuvioiden kautta SSAB:n kautta Docol R8 -putki, jonka SSAB on kehittänyt yhteistyössä AED Motorsportin kanssa. Docol R8 -putket ovat erittäin pitkälle kehitetystä teräslaadusta, missä yhdistyvät korkea lujuus ja muokattavuus. Niiden saatavuus vaihtelee asiakastilauksien mukaan, mutta kokoluokat vaihtelevat kysynnän mukaan valmistuksen korkeiden kustannusten vuoksi. Kyseinen putkimateriaali on saanut hyväksynnän Pohjois-Amerikan kilpa-autoilussa kiihdytysautojen runkomateriaalien pääraaka-aineeksi. Putki on valmistettu kylmämuokkaamalla levystä putkeksi ja sauma on TIG-hitsattu (kuva 38), joten se ei tällä hetkellä täytä FIA hyväksytyjen autoluokkien turvallisuusvaatimuksia. FIA eli kansainvälinen autoliitto vaatii turva-

kaarien ja ajoneuvon turvarakenteissa käytettävien putkien olevan saumattomia.



KUVA 38. Putkiprofiilin hitsaussauma (14, linkit Products-> Tubes-> Docol Tubes R8-> Docol Tube R8 Production Ranges and Standard Dimensions)

Tyypillisiä käyttökohteita tuotteelle autourheilussa ovat

- rungot
- turvakaaret
- pyörätuennan osat.

Tuotteen hyödyt verrattuna tavallisesti käytettyyn materiaaliin kromimolybdeeni ovat

- laatu
- erinomainen hitsattavuus
- kapeat materiaalipaksuudet
- turvalliset murtumisominaisuudet
- kestävä
- hyvä muokattavuus
- hitsattavuus muihin materiaaleihin kuten CrMo 4130- ja perusteräksiin.

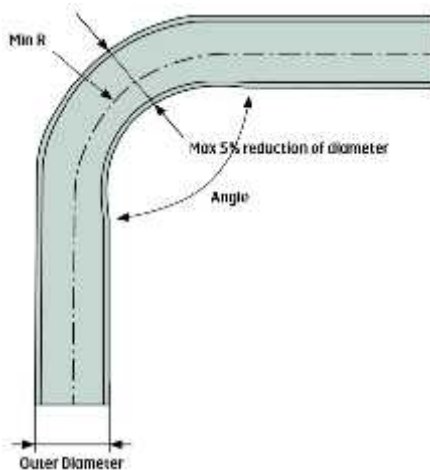
Profile grade	Yield Strength $R_{0.2}$		Tensile Strength R_{m}		Elongation A_{51} % Typical
	MPa min	ksi min	MPa min	ksi min	min
Docol Tube R8	690	100	800	116	11 - 15

Thickness	C % max	Si % max	Mn % max	P % max	S % max	Al % min	Other alloying elements
0.8 - 2.1	0.16	0.4	1.7	0.02	0.004	0.015	Nb, Ti
2.1 - 4.0	0.12	0.10	2.10	0.025	0.010	0.015	Nb, Ti, V

KUVA 39. Docol R8 teräsputken mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet (14, linkit Products-> Tubes-> Docol Tubes R8-> Docol Tube R8 Production Ranges and Standard Dimensions)

Docol R8 -teräkselle on olemassa useita hitsausmenetelmiä, kuten TIG- ja MIG/MAG-hitsaus. Hitsauksessa suositeltuja täytelanka-aineita ovat AWS A5.28 ER80X-X eli eurooppalaisstandardein EN ISO 636-A- W 46xx, sekä ASW A5.28 ER110X-X. (14, linkit Products-> Tubes-> Docol Tubes R8-> Docol Tube R8 Production Ranges and Standard Dimensions)

Putkien taivuttamiseen valmistaja antaa ohjeen, että putken halkaisija saa ka-
ventua enintään 5 % (kuva 40).



KUVA 40. Valmistajan ohjeet taipumalle (14, linkit Products-> Tubes-> Docol Tubes R8-> Docol Tube R8 Production Ranges and Standard Dimensions).

Valmistaja asettaa suosituksia taivutuksessa käytettävälle taivutinkaralle. Karan tarkoitus on estää putken liiallinen kuroutuminen ja mahdollistaa taivutuksen oikean kaarevuuden. Taivutuskarojen käyttö taivutuksen yhteydessä riippuu putkimateriaalin halkaisijasta ja seinämävahvuudesta (kuva 42). Taivutuskaroja käytetään, jotta vältetään yli 5 %:n halkaisija kuroutuminen.

R/ø Without wiper

ø/t	2.5	3	4	5
12	P	P	N/A	N/A
15	P	P	P	N/A
20	1	1	P	P
25	1	1	1	P
30	2	2	1	1
40	3	2	2	1

N/A, Mandrel not recommended

P, Plug mandrel recommended

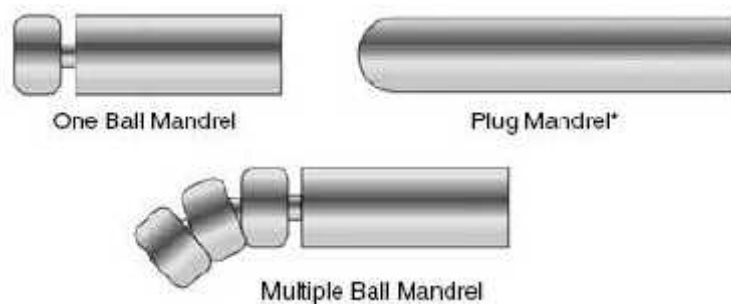
1-, 2- or 3-ball regular pitch mandrel recommended

ø/t Outer diameter of tube/wall thickness

R/ø Centerline radius of the bend /outer diameter of tube

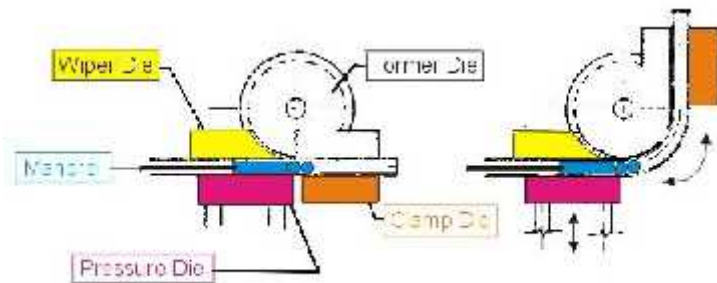
KUVA 41. Valmistajan ohjeet taivutuksessa käytettävälle taivutuskaralle (14, linkit Products-> Tubes-> Docol Tubes R8-> Docol Tube R8 Production Ranges and Standard Dimensions)

Taivutuskaroista yleisimpänä pidetään pallokaroja ja tulppakaroja (kuva 43). Näistä monikäyttöisin on usealla pallolla varustettu ohjauskara.



KUVA 42. Putken taivutuksessa käytettävät ohjauskarojen päätyypit (15, linkit 3-> 3-7-> 3-7-13-> jpg-> p40-1.jpg)

Putken taivuttaminen voidaan suorittaa asianmukaisella putkentaivutus-koneella tai -työkalulla (kuva 44). Taivutusta suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon materiaalin asettamat vaatimukset työkalulle, koska Docol R8 on lujaa materiaalia ja vaatii paljon voimaa taipuakseen.



KUVA 43. Putkentaivuttimen toimintaperiaate (16, linkit Technical Resources-> What is Mandrel Bending?)

Oika-akselin materiaalina käytetään 6082 laatuista alumiinia, joka on yleinen koneistukseen käytetty alumiini, koska sillä on hyvät sitkeys- ja kovuusominaisuudet (kuva 44). Alumiini on seostettu piillä, magnesiumilla ja mangaanilla. Seoksessa piin tehtävä on alentaa sulamispistettä ja lisää sulan aineen juoksevuutta. Lisäksi magnesiumin kanssa se parantaa korroosionkestävyyttä ja hitsattavuutta. Mangaani tuo lujuutta lisääviä ominaisuuksia seoksessa. (17, linkit Ei-rautametallit-> Alumiini)

Tila	Paksuus mm	Vetolujuus R_m N/mm ²		0.2% myötölujuus $R_{0.2}$ N/mm ²	Venymä A_{50mm}		Brinell kovuus HBS
		min.	max.		% min.	% min.	
T4	1.5-12.5	205	-	110	12-15		58
T6151	12.5-175	275	-	200		8-12	81
T651	12.5-175	275-295	-	230-240		4-8	83-89
T651	1.5-6	310	-	260	6-10		91-94

KUVA 44. Alumiini 6082:n lujuustekniset ominaisuudet (18, linkit Tekninen informaatio-> Mekaaniset ominaisuudet-> Levyt)

Pyörätuennan holkkien materiaalina käytetään yleisesti kilpakäytössä olevaa polyuretaania, koska sen riittävä jäykkyys ja lujuus varmistavat tarkan ohjautuvuuden ja pienet pyörän kulmien muutokset tukivarsien laakeroinneissa jarrutus ja joustotilanteissa. Polyuretaani (kuva 45) on myös työstettävissä sorvaamalla, joten raaka-ainemateriaalina holkkien valmistamiseen se on erinomainen. Työssä olevaan alustaan ei ole valmiina valmistajan toimesta sopivia holkkeja. Holkkimateriaalina käytetään kovuudeltaan ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan ajoneuvokäyttöön soveltuvaa Shore 90- tai Shore 70 -polyuretaanitankoa.



KUVA 45. Polyuretaanitanko (19, linkit Products-> Urethane Round Bars)

Muissa osissa voidaan käyttää S235-laatuista terästä, joka on riittävän lujaa ja sitkeää. Teräs täyttää tarvittavat lujuusvaatimukset ja kestää niihin kohdistuvat voimat. Tällaisia osia ovat esimerkiksi kierreholkit ja tukivarsien kiinnityskorvakkeet.

3.5.2 FEM-analyysit

Lujuusmitoituksen FEM-analyysi tehdään SolidWorksin lujuussimulaatio-ohjelmalla. Tällä menetelmällä voidaan tutkia aikaisemmassa kuormitusosiossa laskettujen kuormitusten vaikutusta rakenteisiin. Tukivarsiin ja erityisesti alatukivarteen kohdistuu todella paljon erilaisia kuormituksia ääriajotilanteissa. Solidworksin FEM-analyysi käyttää jännityshypoteesina vakimuodonmuutosenergia- ja vakimuodonvääristymisen energian eli von Misesin-lujuushypoteesiä.

Kaarrevakaimen lujuusmitoitus

Kaarrevakaajan lujuusmitoituksessa otetaan huomioon momentin varsi vääntövarren päästä vakaaja-akselin keskiosaan. Mitoitusta varten laskettu painonsiirtymä tuli pystyä siirtämään tasaisesti sisäkaarten puoleiselle pyörälle, jotta kitkavaatimus ei ylitä käytettävissä olevaa kitkaa renkaan ja tienpinnan välisessä kontaktissa.

Painonsiirtymän laskemiseen tarkoitetun kaavan 6 mukaan painonsiirtymä on maksimi pidon rajoissa:

$$S = \frac{F \times h}{l} = \frac{m \times g \times h}{l} = \frac{3 \cdot 8 \cdot N \times 0,6m}{1,4 \cdot m} = 1,45 \text{ k}.$$

Kun tulos kerrotaan vääntövarren pituudella $x = 0,15 \text{ m}$, saadaan kaarrevakaimeen kohdistuva momentiksi.

$$T = F \times x$$

KAAVA 21

$$T = 1453 \text{ N} \times 0,15 \text{ m} = 217,95 \text{ N}$$

Lasketaan momentin aiheuttama vääntöjännitys (kaava 17), kun vakaajan tangon pituudeksi L on mitattu 980 m ja liike d on $0,1 \text{ m}$.

$$\tau_v = \frac{T}{W_v} = \frac{T}{\pi \times \frac{d^3}{16}}$$

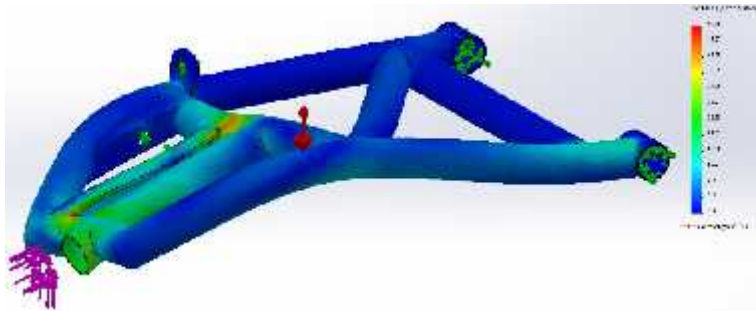
KAAVA 22

$$\tau_v = \frac{217,95 \text{ N}}{\pi \times \frac{(0,1m)^3}{16}} \approx 111,03 \text{ M}$$

Normaalin teräksen pitäisi kestää siinäkin tapauksessa, että varmuuskerroin on 2, koska se on alle normaalin S235-laatuisten teräksen murtolujuuden 215 MPa.

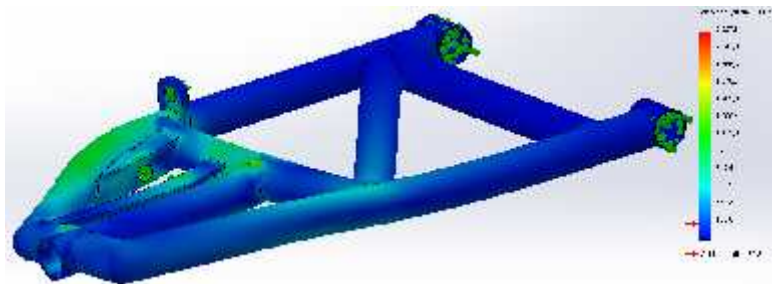
Tukivarsien FEM-analyysi

Tukivarsien lujuusmitoitus on hieman mutkikkaampi, joten sen kesto tulisi analysoida FEM-analyysinä Solidworksilla. Muodostetaan kaksi erilaista lujuusanalyysiä eri voimilla. Ensimmäisessä tapauksessa kaarreaajo ja jarrutusvoimat kuormittavat tukivarsia ja aiheuttivat jännityksen kappaleeseen (kuva 46).



KUVA 46. Kuormitustapauksen 1. aiheuttama jännitys kappaleessa

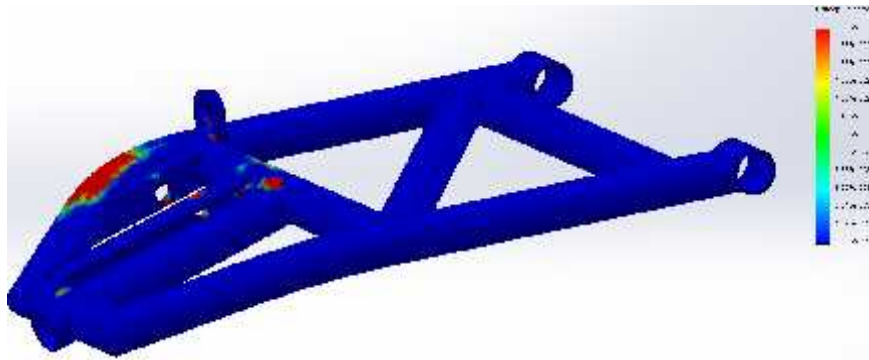
Toisessa kuormitustapauksessa ajoneuvon pyörätuentaan kohdistui tieheräte, joka sai aikaan taivutusvoiman (kuva 47).



KUVA 47. Kuormitustapauksen 2. aiheuttama jännitys kappaleessa

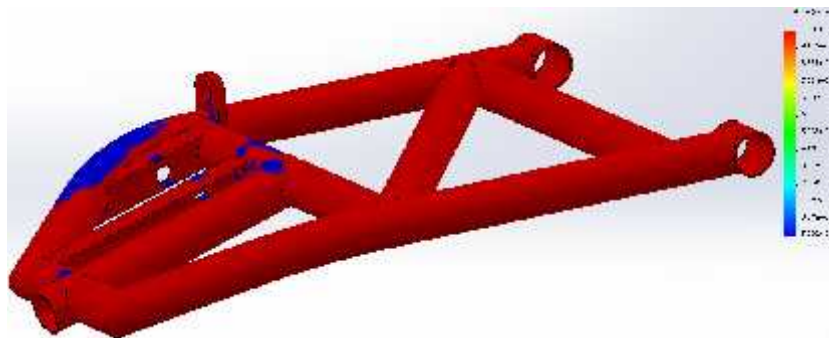
Kuormitustapauksien aiheuttama jännityshuippu 742 MPa oli hieman Docol R8 -materiaalin myötölujuutta suurempi. Rakennetta vahvistettiin, jotta se kesti enemmän kuormituskertoja. Vahvistustoimenpiteenä nivelen kiinnityspotkea jatkettiin tukivarren puoleen väliin ja iskunvaimentimien kiinnityspisteiden I-palkit muutettiin L-palkeiksi.

Väsymismurtumistarkastelussa rakenteeseen alkoi ilmaantua väsymistä n. 5 000 kuormituskerran jälkeen. Tukivarren ottaessa vastaan n. 15 kN suuruisen voiman 5 000 kertaa, ohjelma analysoi rakenteen murtuvan muutamasta kohdasta. Murtumakohdat näkyvät kuvassa 48 punaisella värillä.



KUVA 48. Kuormitustapauksen 2. synnyttämä vaurio rakenteessa

Heikoimpien kohtien elinkaari on 5000 kuormituskertaa, mutta muu rakenne kestää huomattavasti pidempään. Kuvassa 49 ohjelma nähdään kuinka ohjelma analysoi rakenteen kestoja väreissä. Punaisella värillä maalatut alueet kestävät arvioilta 1 000 000 kuormituskertaa ja sinisellä värillä merkityt vain 5 000 kertaa.

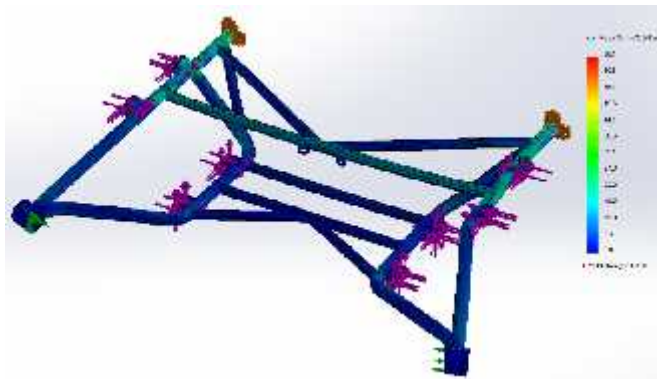


Kuva 49. Kuormitustapauksen 2. mukainen elinkaari tukivarrelle

Väsymisestä huolimatta on hyvin epätodennäköistä, että rata-ajossa näin suuria voimia pääsisi toistumaan murtumiseen vaadittava määrä rakenteiden uusimisen välillä. Tämän vuoksi rakenne pidettiin muuttamattomana ja sitä pidettiin soveltuvana käytettäväksi pyörätuennassa.

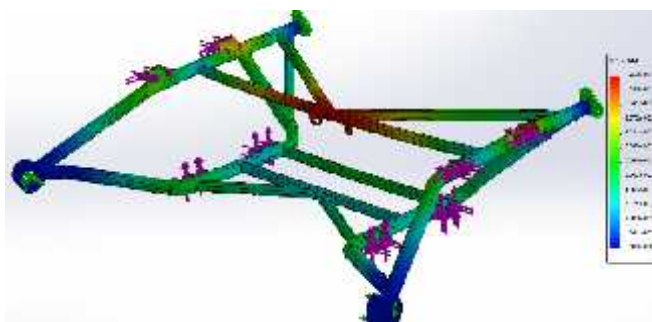
Apurungon FEM-analyysi

Apurungon lujuusanalyysissä käytetään Solidworksin lujuussimulaatiosta saatua ja suuntavoimia, jotka kohdistuvat tukivarsien kiinnityspisteisiin apurungossa. Kuormittavat voimat saatiin, kun tarkasteltiin tukivarsien FEM- analyysissä Result Forces -vaihtoehtoa, joka näytti syntyvät voimat kunkin koordinaattiakselin suunnassa. Nämä voimat syötettiin apurungon FEM-analyysiin ja näin saatiin syntynyt jännitys rakenteessa (kuva 50).



KUVA 50. Voimien aiheuttama jännitys apurungossa

Voimat aiheuttivat pienen kimmoisan, kokoluokaltaan 1 millimetrin suuruisen muodonmuutoksen apurunko-rakenteessa. Suurimmat vääntymiset kohdistuivat rakenteen puolia yhdistävään ylempään ristikkoon, joka voidaan todeta tarkasteltaessa kuvaa 51. Muodonmuutos on sitä suurempi, mitä punaisemmalla värillä ohjelma on kohdan värjännyt.



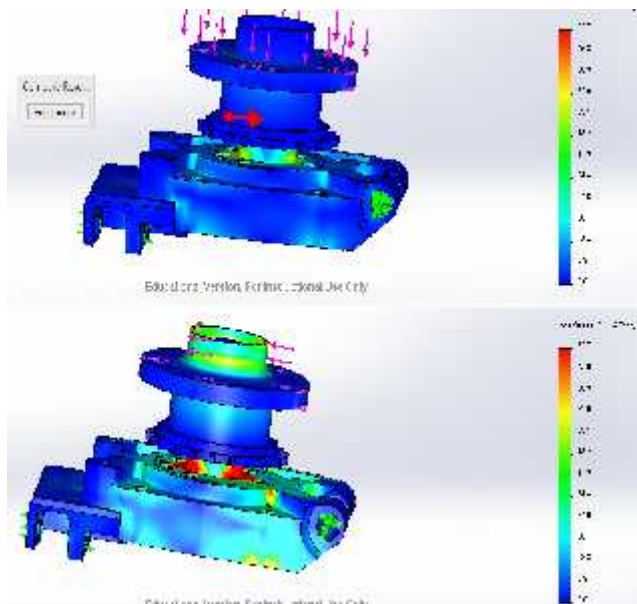
KUVA 43. Voimien aiheuttama muodonmuutos apurungossa

Suurin jännitys kuormitustapauksessa jäi vain 45,4 MPa:n suuruiseksi. Tämä on alle kymmenesosa Docol R8 -materiaalin myötölujuudesta. Lisäksi rakenteen pitäisi kestää yli 60 000 kuormituskertaa tällaisella kuormituksella ilman vaurioita.

Pyörännavan FEM-analyysi

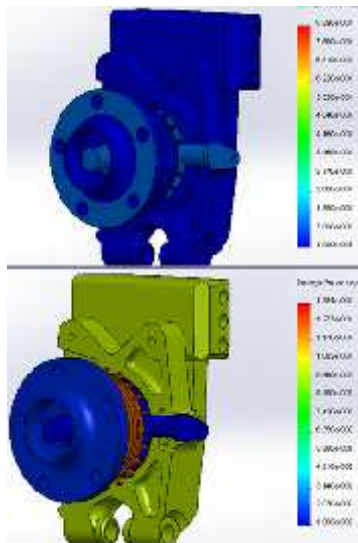
Pyörännavalla on sama lujuusvaatimus kuin muullakin pyörätuennalla: sen tulee kestää pyörätuentaa kuormittavat voimat pettämättä ajon aikana. Pyörännavan lujuusmitoitukseen käytetään Solidworksin FEM-analyysitoimintoa. Simulaatiolla voidaan tarkistaa hetkellisen rasituksen aiheuttama jännitys rakenteessa sekä pidemmällä aikavälillä toistuva rasitus, joka aiheuttaa rakenteeseen väsymistä.

Luodaan kaksi eri kuormitustyyppiä, joista ensimmäisessä käytetään jarrutuksen ja kaarreajon aiheuttamia voimia, jotka kohdistuvat pyöränlaakeriin. Toisessa tapauksessa käytetään tien epätasaisuuden aiheuttamaa voimaa. Molemmille tapauksille tehdään staattinen analyysi ja eliniän analyysi, jossa kuormittavien voimien kuormituskerrat pyörivät n. 10 000 kuormituksen paikkeilla. Tämä on aivan riittävä kilpa-ajoneuvolle, jonka elinkaaren aikana osat puretaan, tarkistetaan ja kasataan useita kertoja tuona aikana.



KUVA 52. Kappaleen sisäiset jännitykset tapauksessa 1 ja 2

Jännityksen maksimi rajoittuu pyörän napa-akseliin (kuva 52). Toisen tapauksen jännityksen maksimi on n. 217,1 MPa, mikä on likimain tavallisen S235 rakenneteräksen myötölujuuden 215 MPa verran. Suurin taipuma kappaleessa syntyy myöskin akseliin, joka taipuu voiman vaikutuksesta n. 0,34 millimetriä. Suunnittelun kannalta olennaista on myös tietää, kuinka kauan kappale kestää toistuvaa kuormitusta. SolidWorksin FEM analyysi antaa kappaleelle myös siihen syntyneen vahingon kuormituksen tiedetyn ajan kuluessa ja kuinka monta kuormituskertaa kappale kestää.

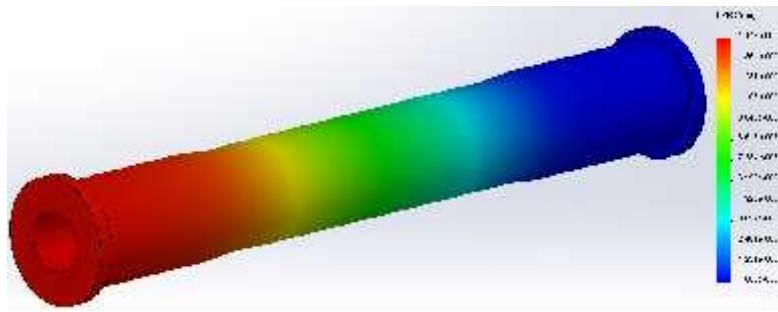


KUVA 53. Kokoonpanon eri komponenttien kärsimä vahinko

Kummassakin tapauksessa kappale kärsi 10 000 kuormituskerran jälkeen alle prosentin kokoluokkaa olevia vahinkoja. Lisäksi kappaleen elinkaaren pituudeksi muodostui alimmillaankin yli 12 500 kuormituskertaa.

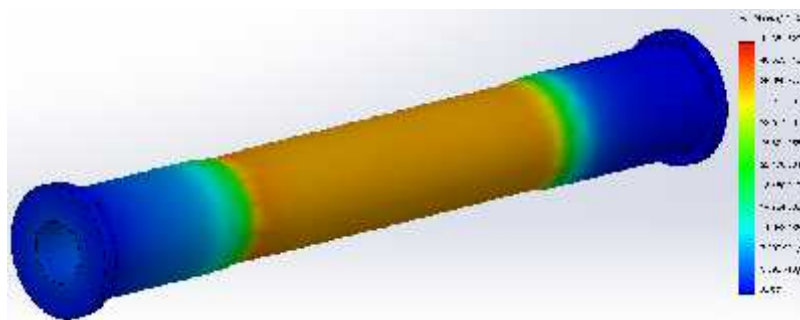
Aurauksensäätötangon FEM-analyysi

Aurauksensäätötanko on nivelöity kummastakin päästä pallonivelin. Kiinnitykset tulevat ylätukivarren apurungon kiinnitys korvakkoon ja olka-akselin vääntövarteen. Tästä johtuen aurauksensäätötankoon voi kohdistua vain vetoa ja puristusta. Voimat syntyvät pääosin jarrutuksen aikana ja kaarteissa ajettaessa. Voimana käytetään jarrutuksessa syntynyttä vetovoimaa.



KUVA 54. Tangon venymä kun sitä vedetään määrätyllä voimalla

Analyysiin syötetyllä 3 kN:n voimalla tangon venymäksi tuli n. 0,04mm (kuva 54). Suurin jännitys, joka muodostui keskelle tankoa, oli noin 36,2 MPa, mikä on alle 6063-O laatuksen alumiinin myötölujuuden. Suurimman jännityksen paikka on keskellä auruksensäätövartta, mikä voidaan todeta kuvasta 56.



KUVA 55. Vedon aiheuttama sisäinen jännitys

4 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella vaihtoehtoinen takajousitus Audi A1 -henkilöauton alkuperäisen yhdystukiakselin tilalle. Jousituksesta tuli laatia täydellinen 3D-malli, jonka kestävyys analysoitiin tietokoneella. Jousitus tuli suunnitella siten, että se on valmistettavissa tarvittaessa Oamkin tiloissa ja työkaluilla.

Pyöräkuormien määrittämisessä työkaluina toimivat ajosiltanosturi ja ajoneuvokäyttöön tarkoitetut pyöräkuormava'at. Pyörätuennan mittojen määrittäminen tapahtui mittaamalla ajoneuvon runkogeometriaa rulla- ja työntömitalla sekä Zeissin 3D-mittalaitteella. Mittaamisen tarkkuutta voisi kuvata hyväksi, koska esimerkiksi samoin menetelmin saatiin rakennettua ajoneuvoon täysin sopivat iskunvaimentimet.

Mittojen perusteella laadittiin alustava malli ajoneuvon pyörätuennasta kokeilemalla useita erilaisia ratkaisuja Solidworks-ohjelmalla ja pohtimalla, mikä oli paras ratkaisu ajoneuville. Vaihtoehdon selvittyä sitä alettiin työstämään yksityiskohtaisemmaksi. Tuloksena syntyi yksityiskohdiltaan hyvin tarkka suunnitelma, jonka pohjalta ajoneuvon jousituksen komponentit voidaan valmistaa ja hankkia.

SolidWorksin 3D FEM -analyysissä selvisi myös muutamia rakenteita ja komponentteja, joita täytyi muuttaa vahvemmaksi, jotta ne kestäisivät ajossa syntyviä kuormituksia. Rakenteita vahvistettiin ja materiaaleja muutettiin useita kertoja, kunnes niiden kestävyys oli vaaditulla tasolla. Solidworksin FEM-analyysi käyttää jännityshypoteesina vakiomuodonmuutosenergia- ja vakiomuodonväristymisenergian eli von Misesin luujuushypoteesiä.

Työssä suunniteltua alustaratkaisua ei voida mistään valmiina kokonaisuutena hankkia Audi A1 -ajoneuvoon, ja siksi tarvitaankin hyvä mallipohja, kun kyseisen tyyppiset autot yleistyvät kilpa-ajoneuvoina tulevaisuudessa. Lisäksi suunnitelma on helposti muokattavissa myös muihin saman kokoluokan ajoneuvoihin, kuten Volkswagen Polo, Ford Fiesta, Skoda Fabia ja periaatteessa kaikkiin ajo-

neuvoihin, jotka on varustettu samankaltaisella yhdystukiakselilla kuin opinnäytetyön ajoneuvo.

Työn tuloksena syntyi myös yhteistyösuunnitelmia eri yritysten kanssa, jotka tarjosivat osaamistaan mm. auton iskunvaimennuksessa, joita tilaaja voi hyödyntää tulevaisuudessa tarpeidensa mukaan. Myös materiaalivalinnoissa on suosittu paikallisia yrityksiä ja niiden tuotteita.

Aikataulu näytti aluksi hyvältä, mutta myöhemmin opinnäytetyö venyi henkilökohtaisista syistä. Opinnäytetyö oli aluksi huomattavasti laajempi, koska pyörätuenta oli tarkoitus valmistaa autoon, mutta ohjaavan opettajan kanssa todettiin suunnittelun riittävän kattamaan opinnäytetyöhön vaadittava laajuus yhdelle henkilölle. Valmistus voitaisiin toteuttaa myöhemmin projektiopintoina nuorempien opiskelijoiden tekemänä.

LÄHTEET

1. Mauno, Esko. 1991. Virittäjän käsikirja 2, alusta. Helsinki: Alfamer Oy.
2. Renkaan kaartuminen camber-kulman vaikutuksesta. 1997. Tony Foale. Saatavissa: <http://www.tonyfoale.com>. Hakupäivä 20.9.2015.
3. Niemi, Markku – Nieminen, Simo. 2001. Autotekniikan perusteet 3. Vantaa: TummaVuoren kirjapaino Oy.
4. Haataja, Mauri 2014. TL1543 Autotekniikka 2, luennot 4 op. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu.
5. Hyvärinen, Veikko – Mattila, Pekka – Mylläri, Atte – Rantala, Jouko – Sirola, Jarkko. 2002. Auto- ja kuljetusalan erikoistumisoppi 1, Alusta- ja hallintalaitteet. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
6. Laine, Olavi 1985. Autotekniikka 1. osa, Ajo-ominaisuudet. Autoalankeskus Oy.
7. Raidelevyyden muuttuminen joustoliikkeen aikana. 2015. Robert Q. Riley Enterprises, LLC. Saatavissa: <http://www.rqriley.com/images/fig-9.gif>. Hakupäivä 1.10.2015.
8. Kierrejousi. 2015. Eibach. Saatavissa: <http://eibach.com/oem/en>. Hakupäivä 2.10.2015
9. Lineaarinen- ja parabeelinen lehtijousi. 2015. Lesjöfors Automotive. Saatavissa: <http://www.lesjofors-automotive.com/>. Hakupäivä 2.10.2015
10. Jousen puristusvoima jousen puristuman funktiona. 2015. ContiTech. Saatavissa: <http://213.164.133.30/vcweb>. Hakupäivä 2.10.2015..
11. Korin kallistuminen ilman kaarrevakaajaa ja sen kanssa. 2015. Jelsoft Enterprises Ltd. Saatavissa: <http://forums.nasioc.com/>. Hakupäivä 5.15.2015.

12. Kaarrevakaimen säädettävä vääntövarsi ja säädettävä koiranluu. 2014. Mighty Motor Media. Saatavissa: <http://www.ferdinandmagazine.com>. Hakupäivä 5.10.2015.
13. Staattinen pyöräkuorma ja sen aiheuttamat voimat. 2014. The Car Tech. Saatavissa: <http://www.thecartech.com>. Hakupäivä 11.3.2015.
14. Docol R8 teräsputken mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. 2015. SSAB. Saatavissa: <http://www.meracing.com/> Hakupäivä 19.3.2015.
15. Putken taivutuksessa käytettävät ohjauskarojen päätyypit. 2009. PT. Batam Niaga Perkasa. Saatavissa <http://batamniagaperkasa.com/products/>. Hakupäivä: 19.3.2015.
16. Putkentaivuttimen toimintaperiaate. 2015. Van Sant Enterprises, Inc. Saatavissa: <http://www.trick-tools.com/>. Hakupäivä 19.3.2015.
17. Alumiini 6082 kemiallinen koostumus. 2005. Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaaliopin laitos. Saatavissa: <http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/index.php>. Hakupäivä 20.3.2015.
18. Alumiini 6082:n lujuusteknilliset ominaisuudet. 2015. Alumeco Finland Oy. Saatavissa: <http://www.alumeco.fi/>. Hakupäivä 20.3.2015.
19. Polyuretaanitanko. 2015. Esco Plastics Inc. Saatavissa: <http://www.escoplastics.com/>. Hakupäivä 20.3.2015.
20. Amk-kustannus Oy Tammertekniikka 2010. Tekniikan kaavasto. Hämeenlinna: Kariston kirjapaino Oy.

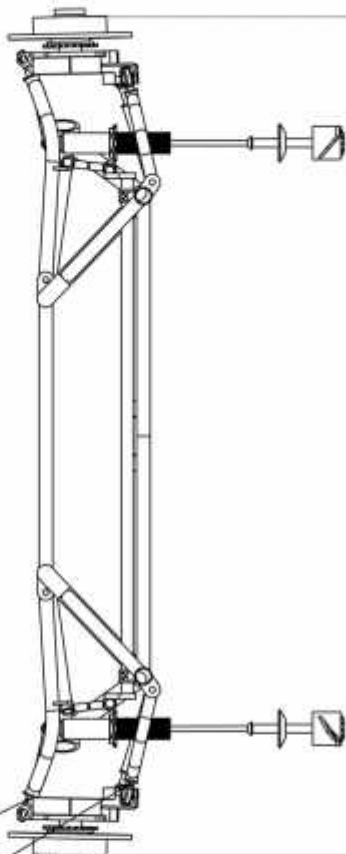
LAHTOTIETOMUISTIO



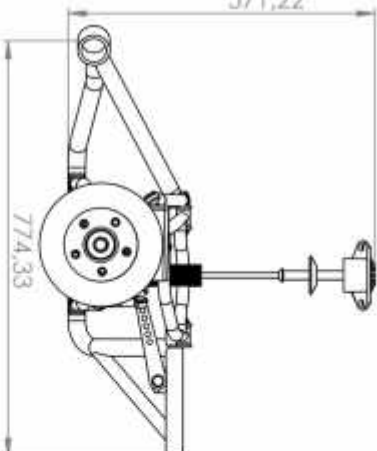
Työn tiedot	Tekijä ¹	Tilaaaja ²
	Janne Alaluusua	OAMK, Autolaboratorio
	Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot ³	
	Arto Lehtonen	
	Työn nimi ⁴	
	Audi A1 erillistakajousituksen suunnittelu ja toteutus	
	Työn kuvaus ⁵	
Työssä oppilas suunnittelee Autolaboratorion Audi A1 henkilöautoon erillijousituksen taka-akselille.		
Työn tavoitteet ⁶		
Tavoitteena on luoda täysin säädettävä rata/kilpa-auton takajousitusratkaisu, joka on turvallinen ja ajettavuudeltaan hyvä sekä valmistettavissa koulun tiloissa ja työkaluilla.		
Tavoiteaikataulu ⁷		
Työn tulee olla valmis keväällä 2015		
Päiväys ja allekirjoitukset ⁸		
<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>		
<div>Tekijän allekirjoitus</div> <div>Tilaaajan allekirjoitus</div>		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite. 2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi. 3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta. 4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan. 5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat. 6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet. 7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa. 8. Lähtötietomuiستio päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaaajan yhdyshenkilö. 		



1561,88



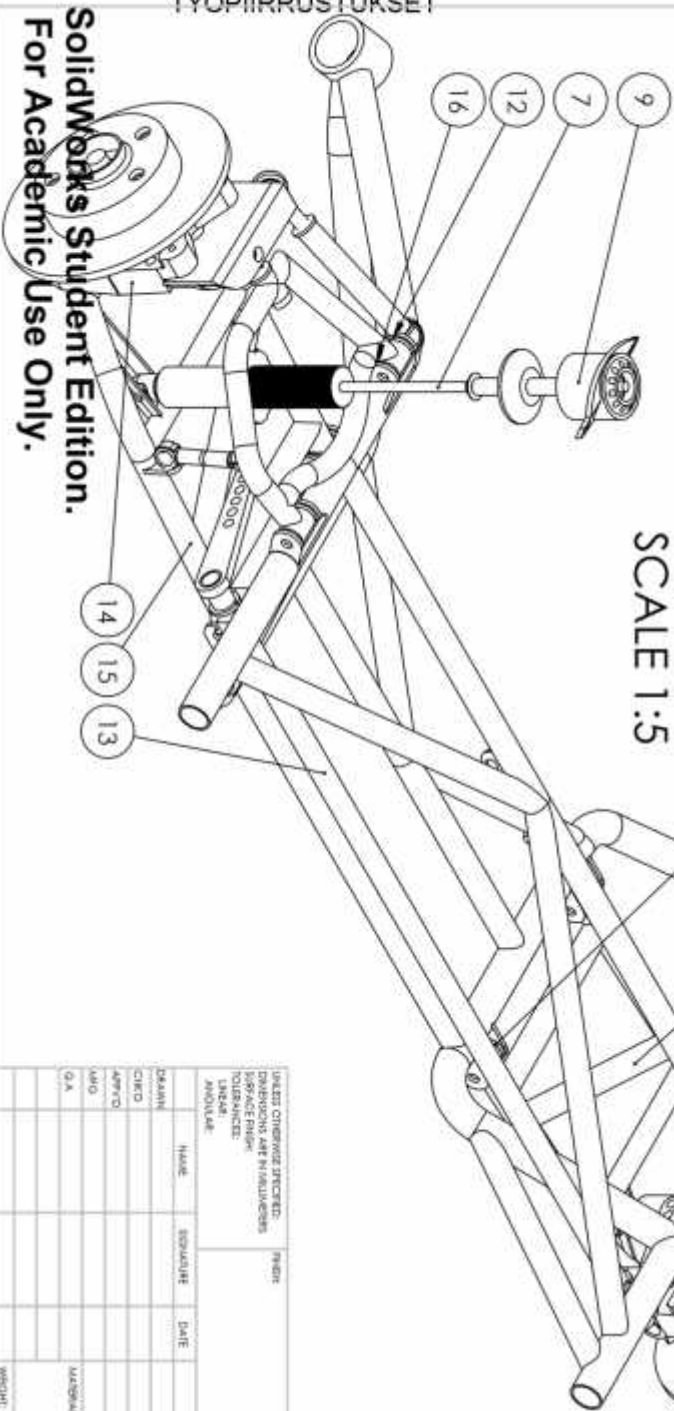
571,22



774,33

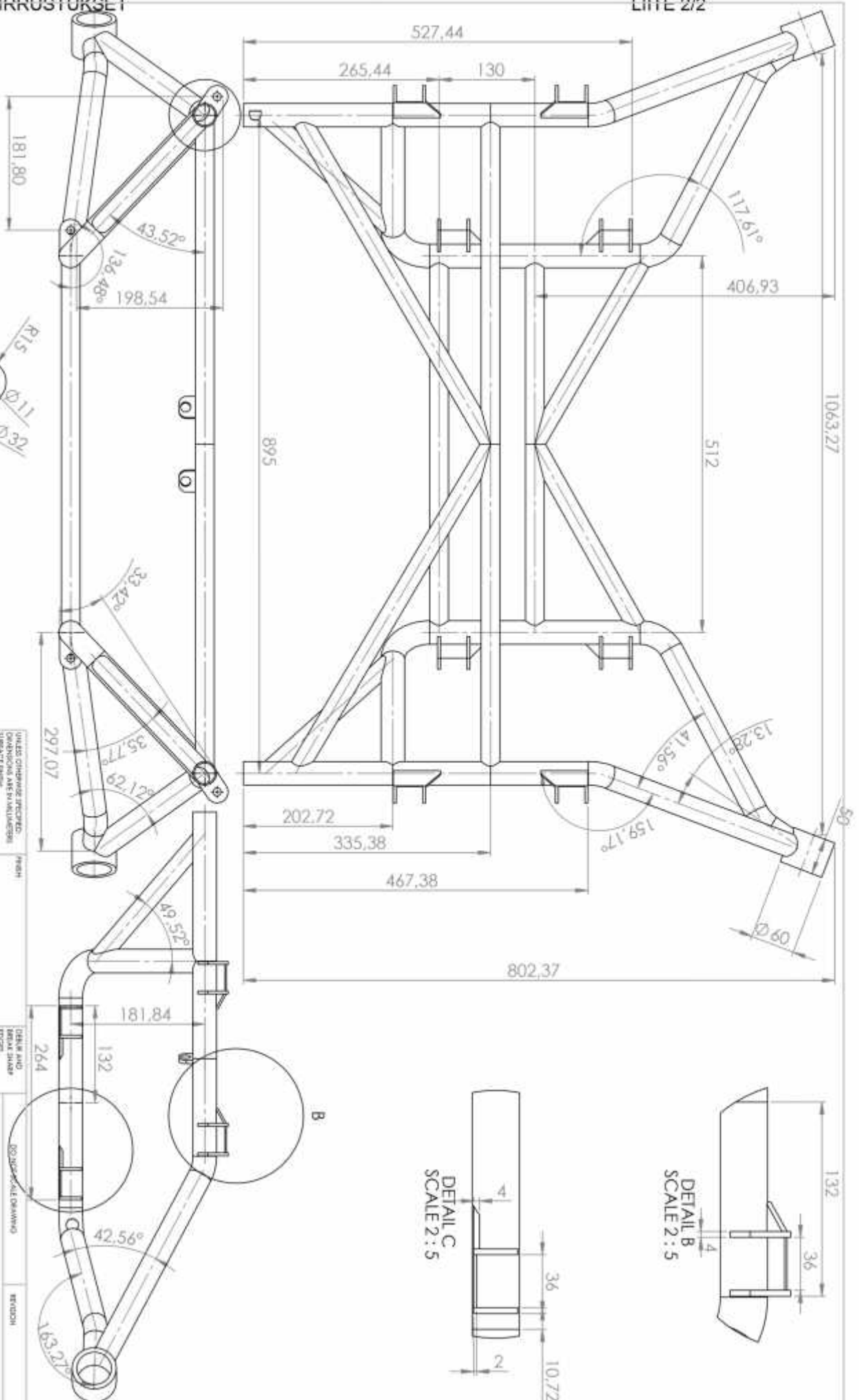
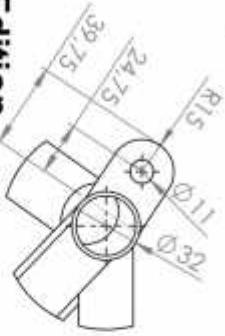
SCALE 1:5

SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.

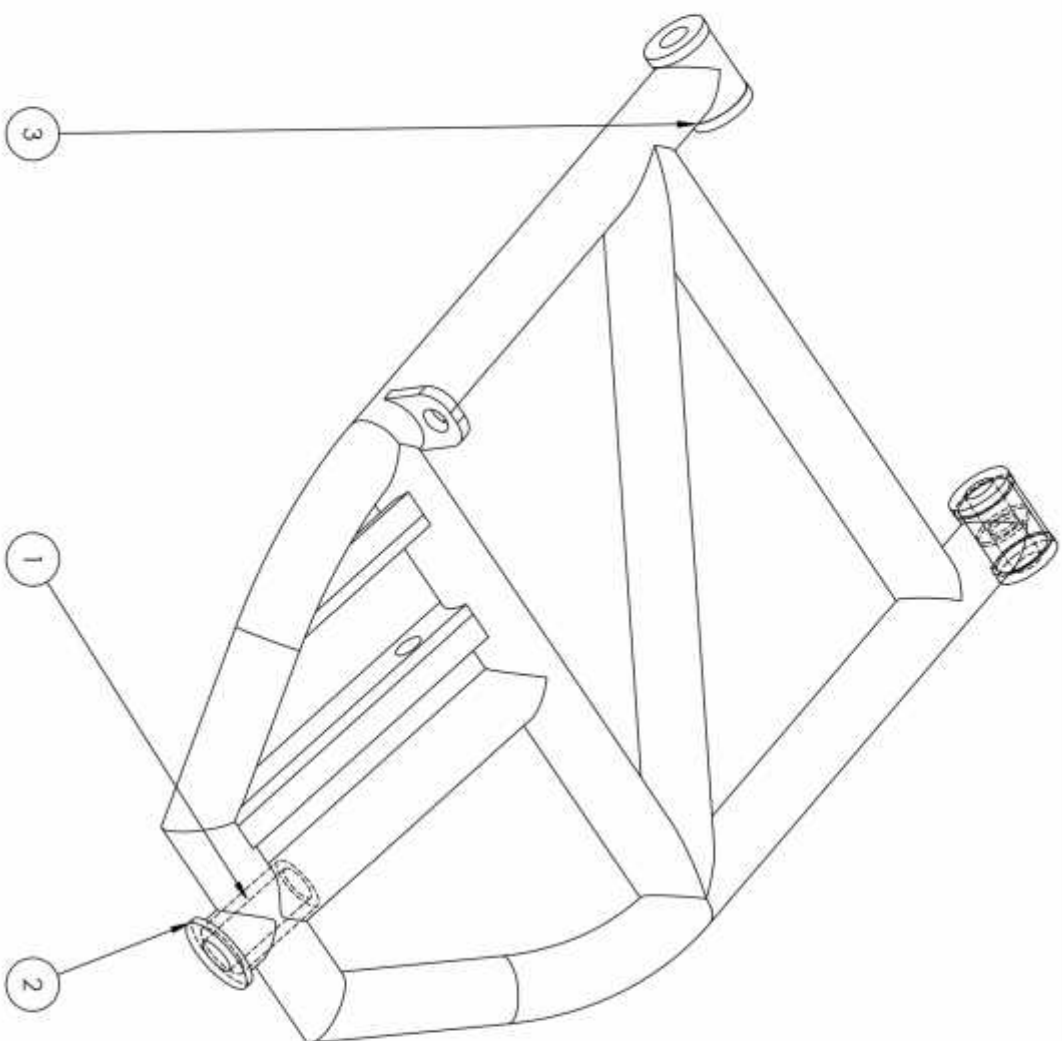


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	opurunko	Runko	1
2	Alatukivari	Alatukivari	1
3	Upright_ford	Oika-akseli	1
4	ISO 10511-M20-N	Napamutteri	2
5	Pustian puolikas	Holkki	8
6	Ylätukivarsipustan puolikas	Holkki	8
7	Takaiskarl_race	Iskurvaimennin	2
8	Pallonivel	Nivel	2
9	Takaikkarin yläkiinnike	Kiinnike	2
10	yätukivari	yätukivari	1
11	Yläpallonivel	Nivel	2
12	Aurauksensäätötanko	Tukitanko	2
13	Kallistuksenvakaja	Kaarevakain	1
14	Mirrorupright_ford	Oika-akseli	1
15	MirrorAlatukivari	Alatukivari	1
16	yätukivarisiputki	yätukivari	1

LISTE CHANGING SHEET: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS TOLERANCES: UNLESS INDICATED				PAPER			
DESIGN	NAME	STATUS	DATE	DESIGN	NAME	STATUS	DATE
CHKD				CHKD			
APP'D				APP'D			
AWD				AWD			
QA				QA			
MATERIAL				SCALE 1:5			
WEIGHT				SHEET 1 OF 2			
TITLE				DO NOT SCALE DRAWING			
DRAWING AND REVISIONS				REVISION			
DRAWING NO.				DRAWING NO.			
alusta				alusta			
A3				A3			



UNITS CHARGED (CHECK ONE) ORIGINAL ART BY MAIL/OTHER COLLAPSE LARGE MATERIAL			PRINT AND BIND EDGE	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE		
OWNER			<div style="text-align: center;"> <h1>Runko</h1> <h2>alusta</h2> </div>		
CHILD					
ARTIST					
ARTIST					
ARTIST			MATERIAL:		
ARTIST			WEIGHT:		
			UNIT NO.	A3	
			SCALE 1:5	SHEET 2 OF 8	



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	alatukivarsi_solid	Alatukivarsi	1
2	tukivarsikierre	Kierrehokki	1
3	Puslan puolikas	Hoikki	4

UNITED STATES STEEL CO. CONNECTION ARE IN ALL DIRECTIONS INTERFACE PHASE TOLERANCES: LINEAL ANGULAR	PHASE	DESIGN AND STEEL SHOP EPOCH	DO NOT CALL DRAWING REVISION
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	-----------------------------------	---------------------------------

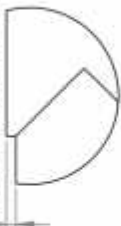
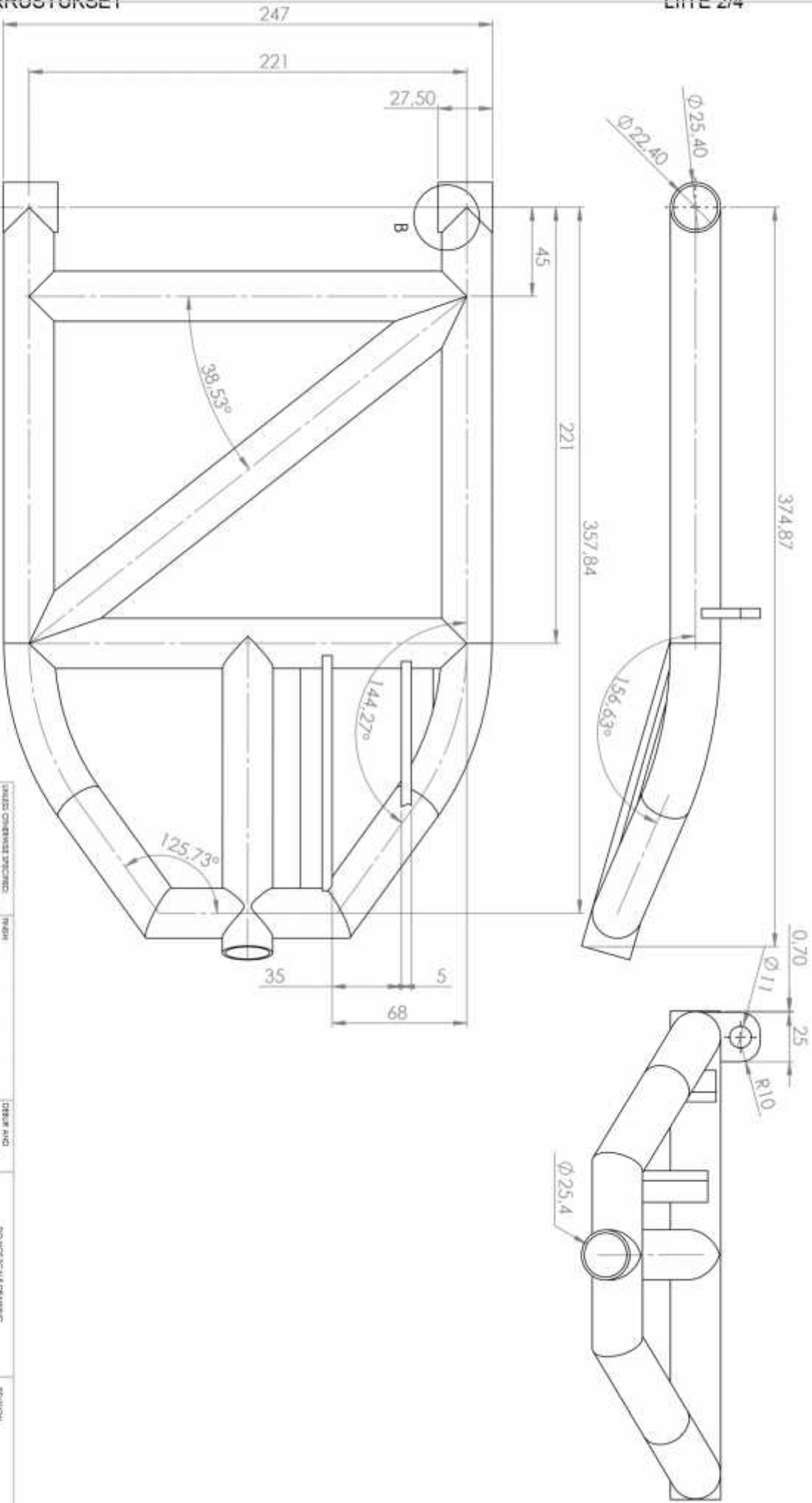
NAME	SIGNATURE	DATE
DESIGN		
CHECKED		
DRAWN		
MATERIAL		
SCALE		
SHEET NO.		
TITLE		

Alatukivarsi_solid

A3

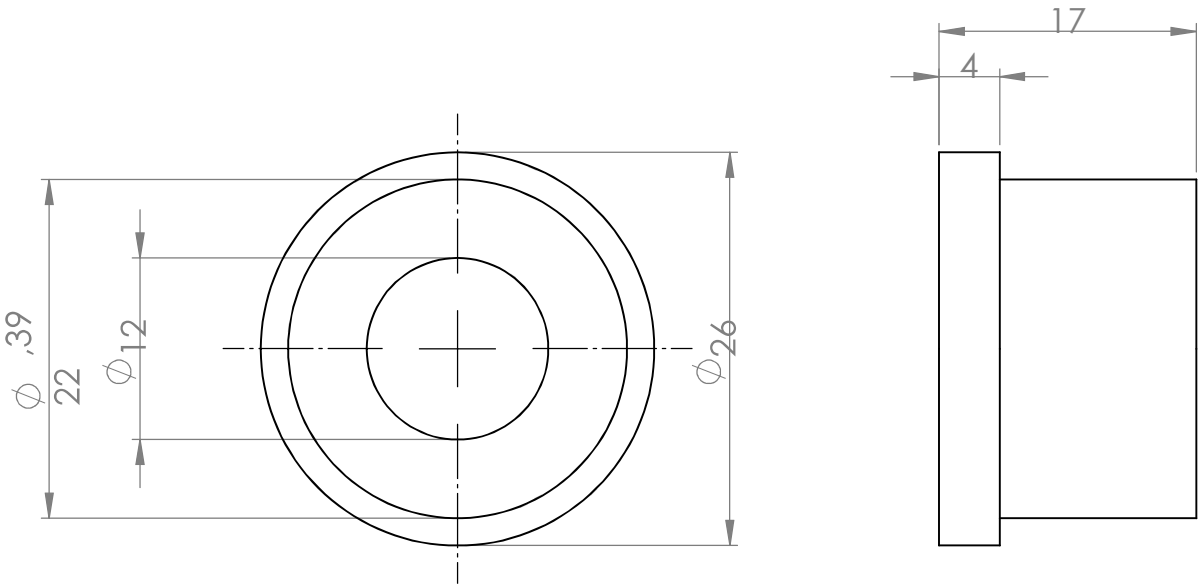
SCALE: 1:1

SHEET 1 OF 4



SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS TOLERANCES: FRACTIONS DECIMALS ANGLES				FINISH		TITLE AND SHEET NUMBER		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN	DATE	ISSUED	DATE								
CHECKED											
APPROVED											
DATE											
SCALE											
DRAWN BY				DATE	DESIGNED BY		CHECKED BY		REVISION		
DATE					DATE		DATE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				
SCALE					SCALE		SCALE				



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN						
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A						

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

DWG NO.

SCALE:2:1

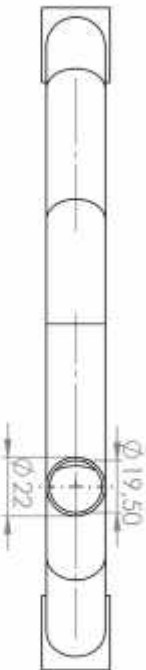
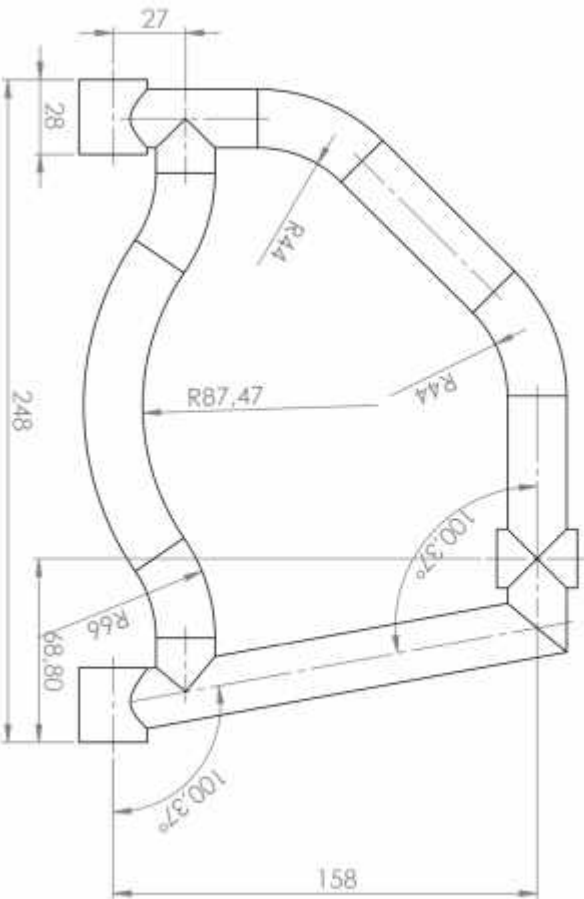
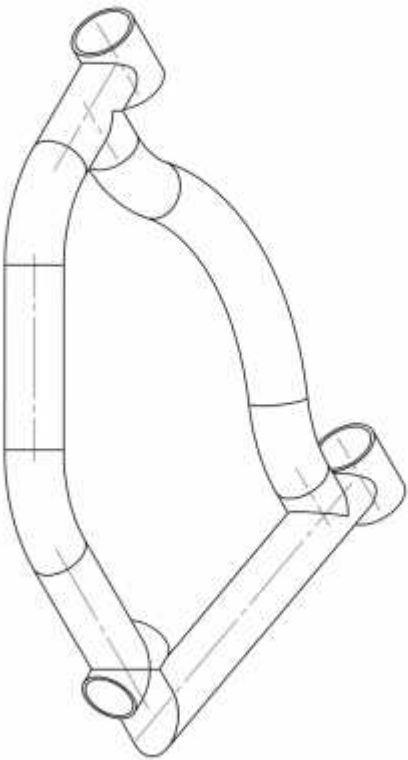
Holkki

Alatukivarsi_solid

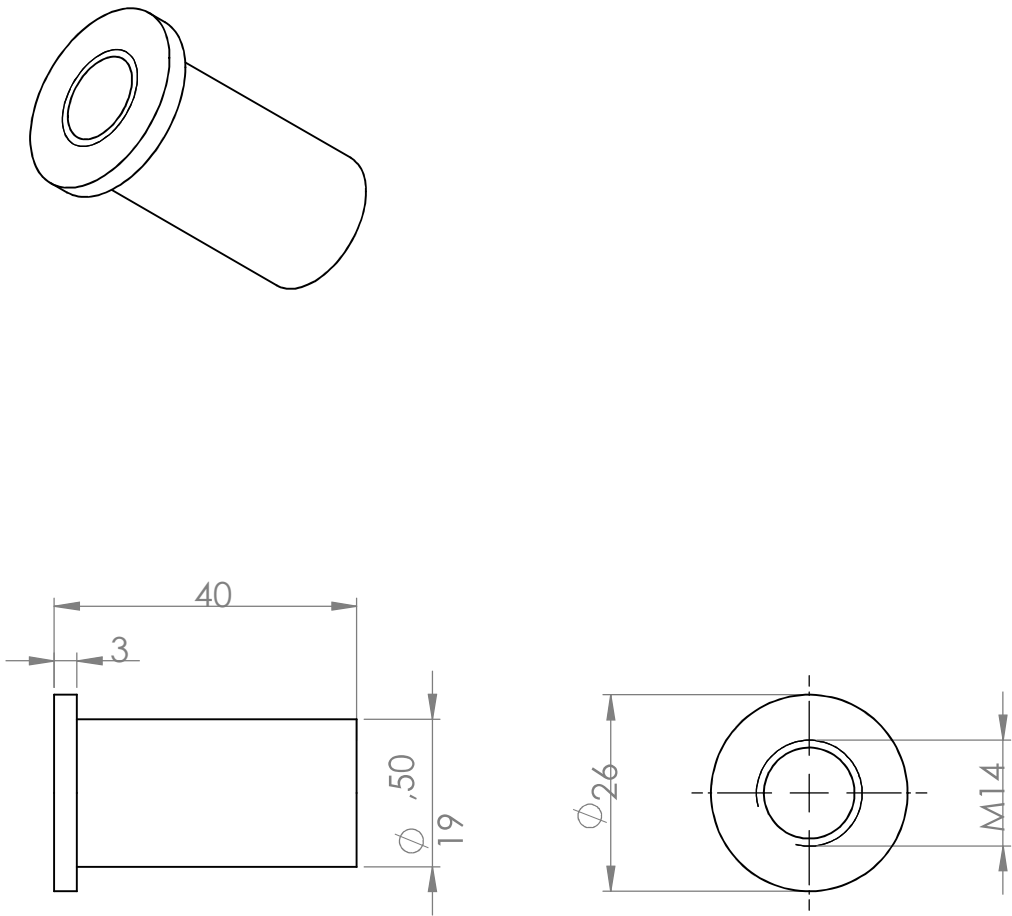
A4

SHEET 3 OF 4

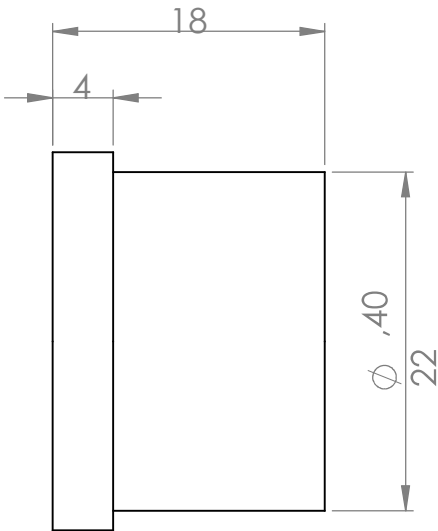
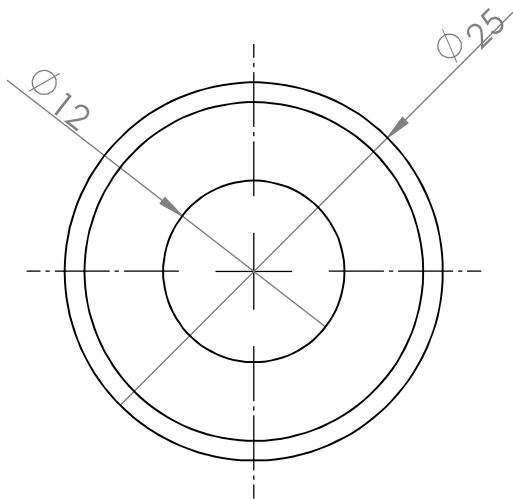
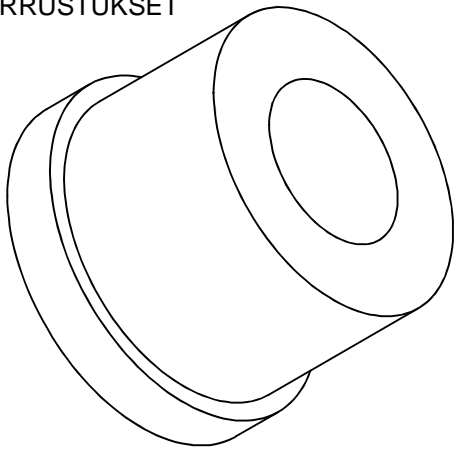
SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.



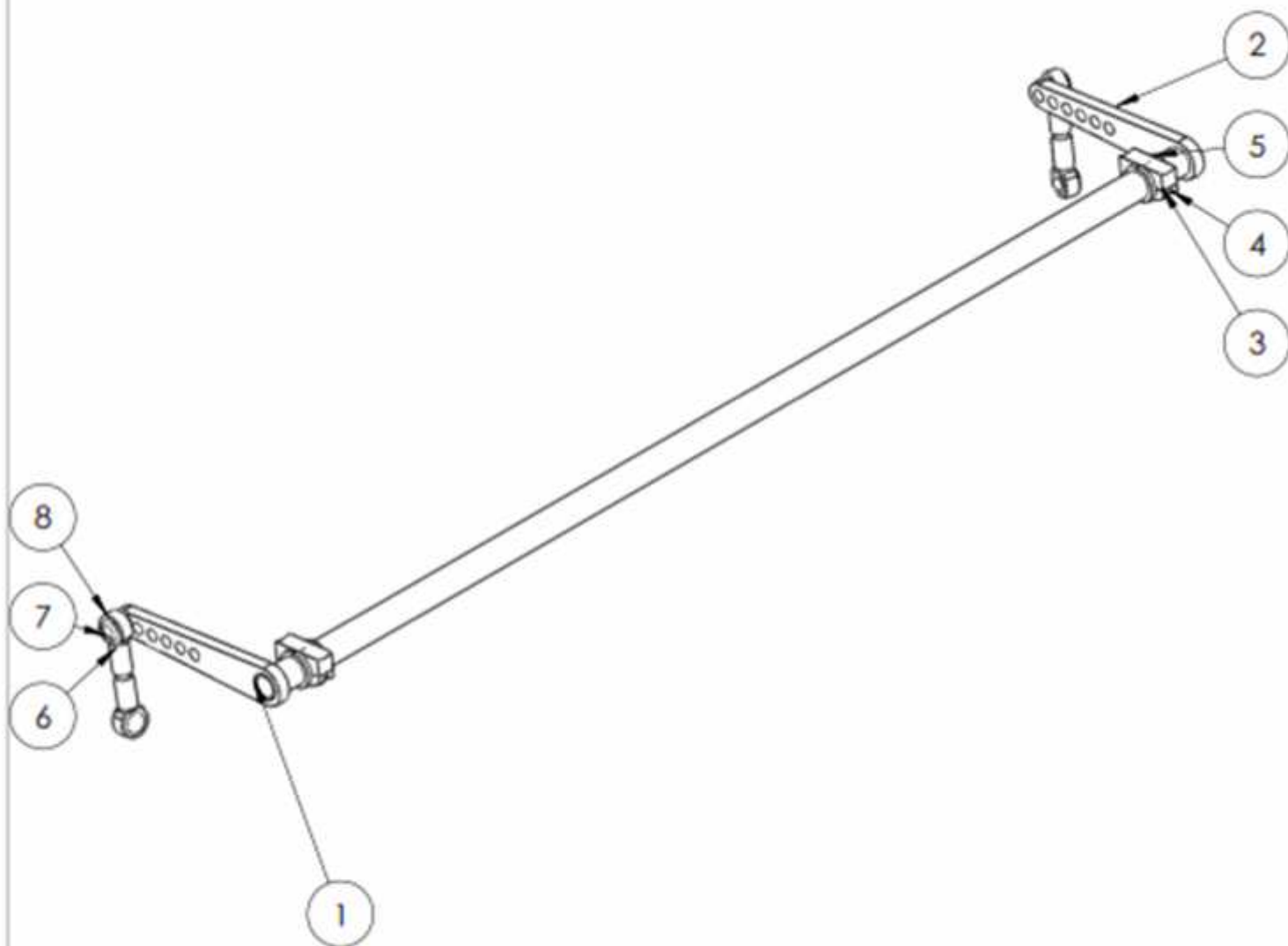
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS TOLERANCES: FRACTIONS DECIMALS ANGLES			TITLE		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY	
TITLE			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	
DRAWN AND CHECKED BY			DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE		DRAWN AND CHECKED BY		DATE	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:					FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION				
NAME		SIGNATURE		DATE						TITLE: <div>Kierreholkki</div>					
DRAWN															
CHK'D															
APPV'D															
MFG															
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		Ylätukivarsikokoonpano		A4			
						WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 3 OF 4					



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								TITLE: <h1>Holkki</h1>			
DRAWN								DWG NO. <h2>Ylätukivarsikokoonpano</h2>			
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A											
								SCALE:2:1			
				MATERIAL:				SHEET 4 OF 4			
				WEIGHT:							



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	kallistuksenvakaaja_tanko	Vääntöakseli	1
2	kallistuksenvakaaja_vääntövarsi	Vääntövarsi	2
3	Kallistuksenvakaaja_pusla	Holkki	2
4	Kallistuksenvakaaja_yläkiinnike	Kiinnike	2
5	Kallistuksenvakaaja_alakiinnike	Kiinnikepohja	2
6	koiranluu_tanko	Yhdystanko	2
7	Pallonivel_pallo 10mm	Nivellaakeri	4
8	pallonivel_runko 10mm	Nivelvarsi	4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

Feature

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES.

DO NOT SCALE DRAWING.

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHECKED			
APPROVED			
MFG			
Q.A.			

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

機上

Kaarrevakain

DWC 102

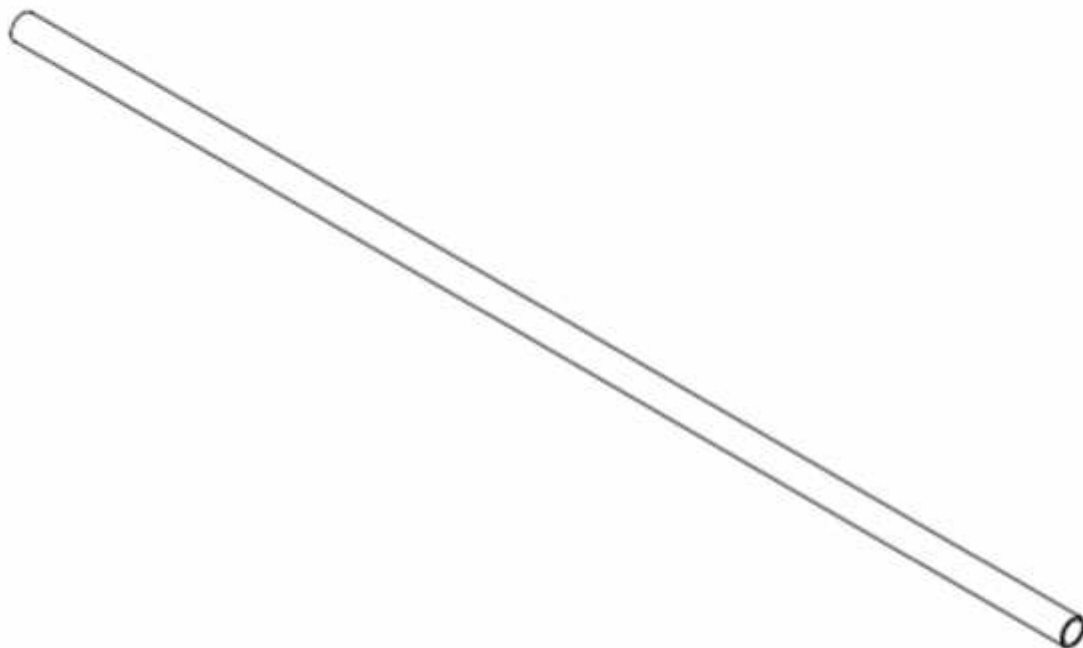
Kallistuksenvakaaja

A4

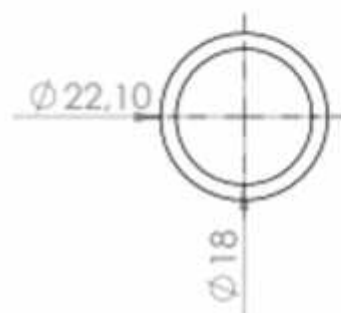


2010年10月

Sheet 1 of 4



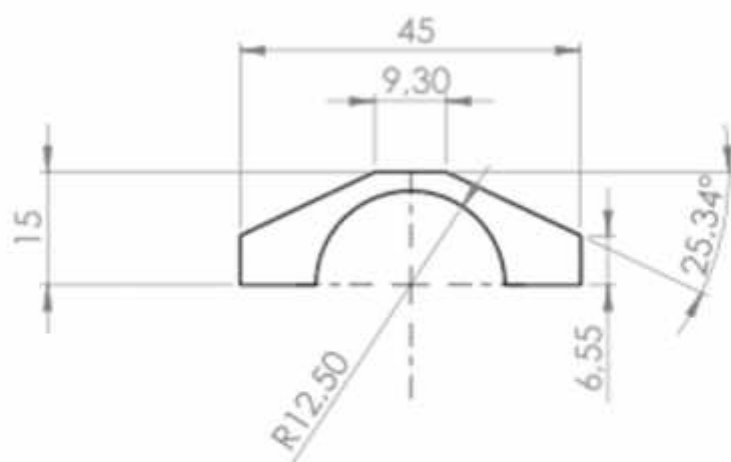
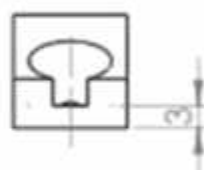
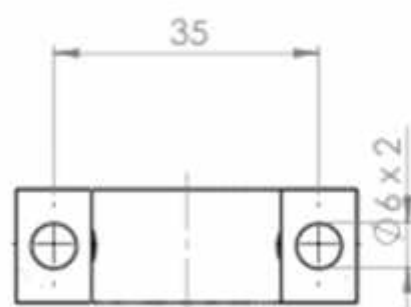
SCALE 1:1



Akselin pituus: 980 mm

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE: <h1>Vääntöakseli</h1>			
DRAWN									
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A						Dwg No. <h2>Kallistuksenvakaaja</h2>			
						A4			
						SHEET 2 OF 4			
				WEIGHT:		SCALE 1:1			

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHECKED			
APPROVED			
MFG			
Q.A			

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

TITLE:

Kiinnike

DWG NO.

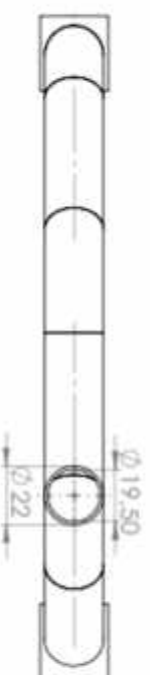
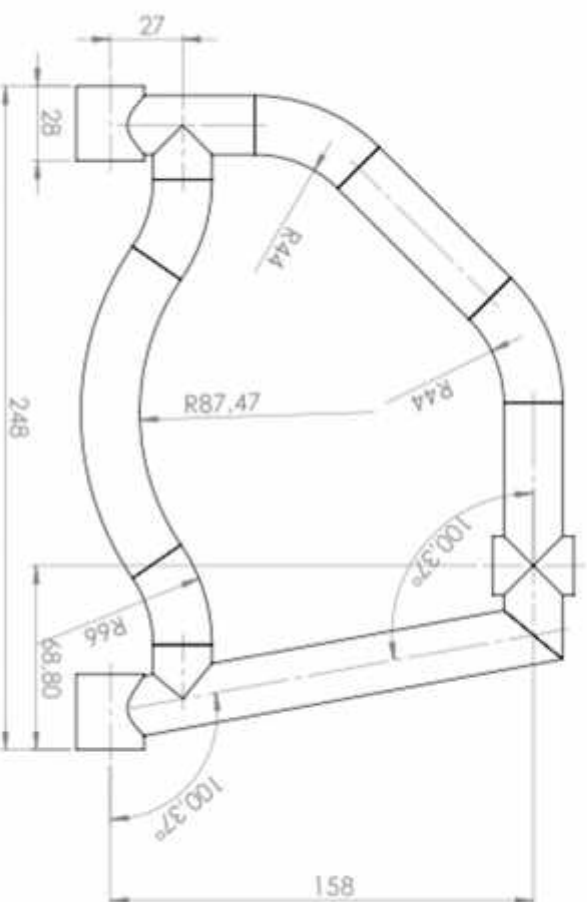
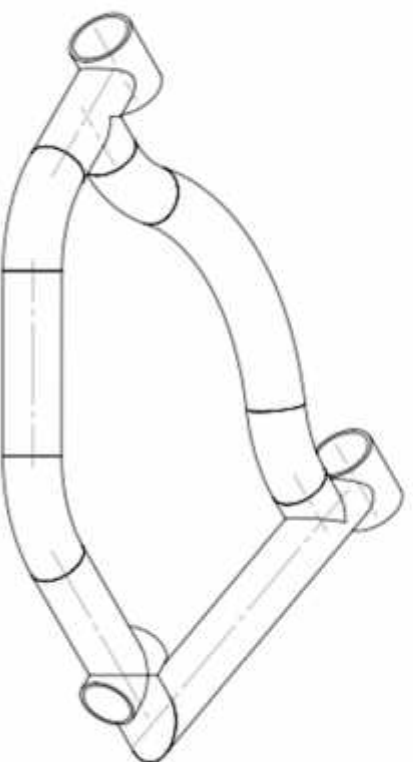
Kallistuksenvakaaja

A4

WEIGHT

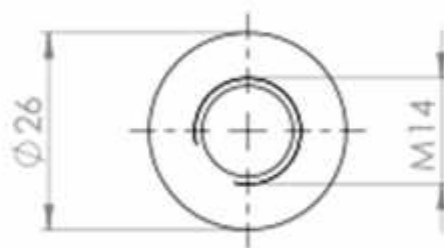
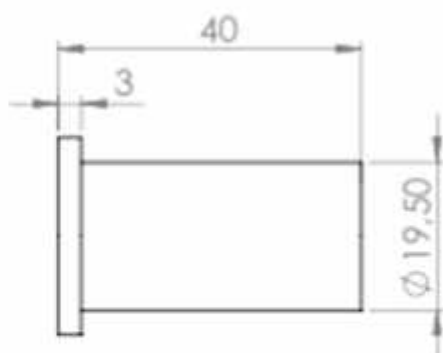
SCALE:1:1

SHEET 5 OF 6



SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.

DESIGNED BY: [Name]		DATE: [Date]		DRAWN BY: [Name]		DATE: [Date]	
CHECKED BY: [Name]		DATE: [Date]		APPROVED BY: [Name]		DATE: [Date]	
TITLE: [Title]		SCALE: [Scale]		SHEET 1 OF 4		A3	
SUBJECT: [Subject]		PROJECT: [Project]		Yläkoulukokoonpano		A3	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

Figure 10.

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'D					
MFG					
Q.A					

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

Table 1

Kierreholkki

DING HONG

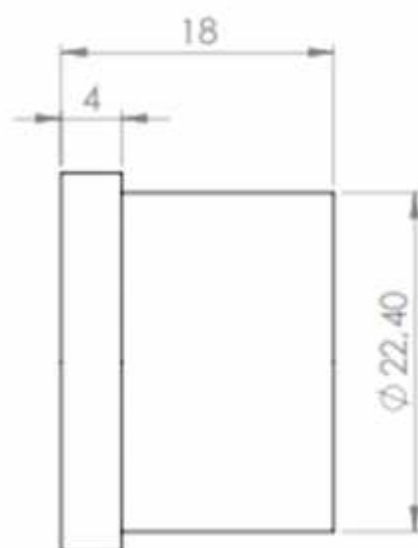
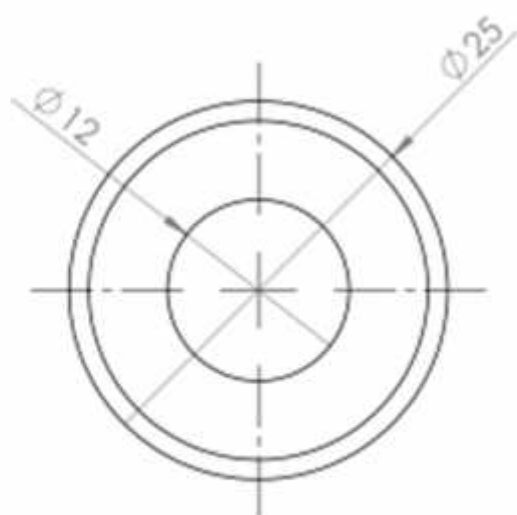
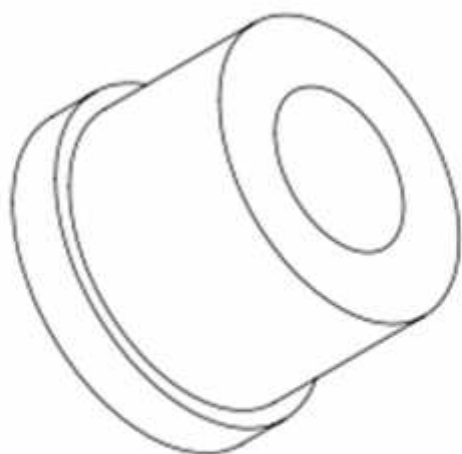
Ylätukivarsikokoonpano

A4

WBGH

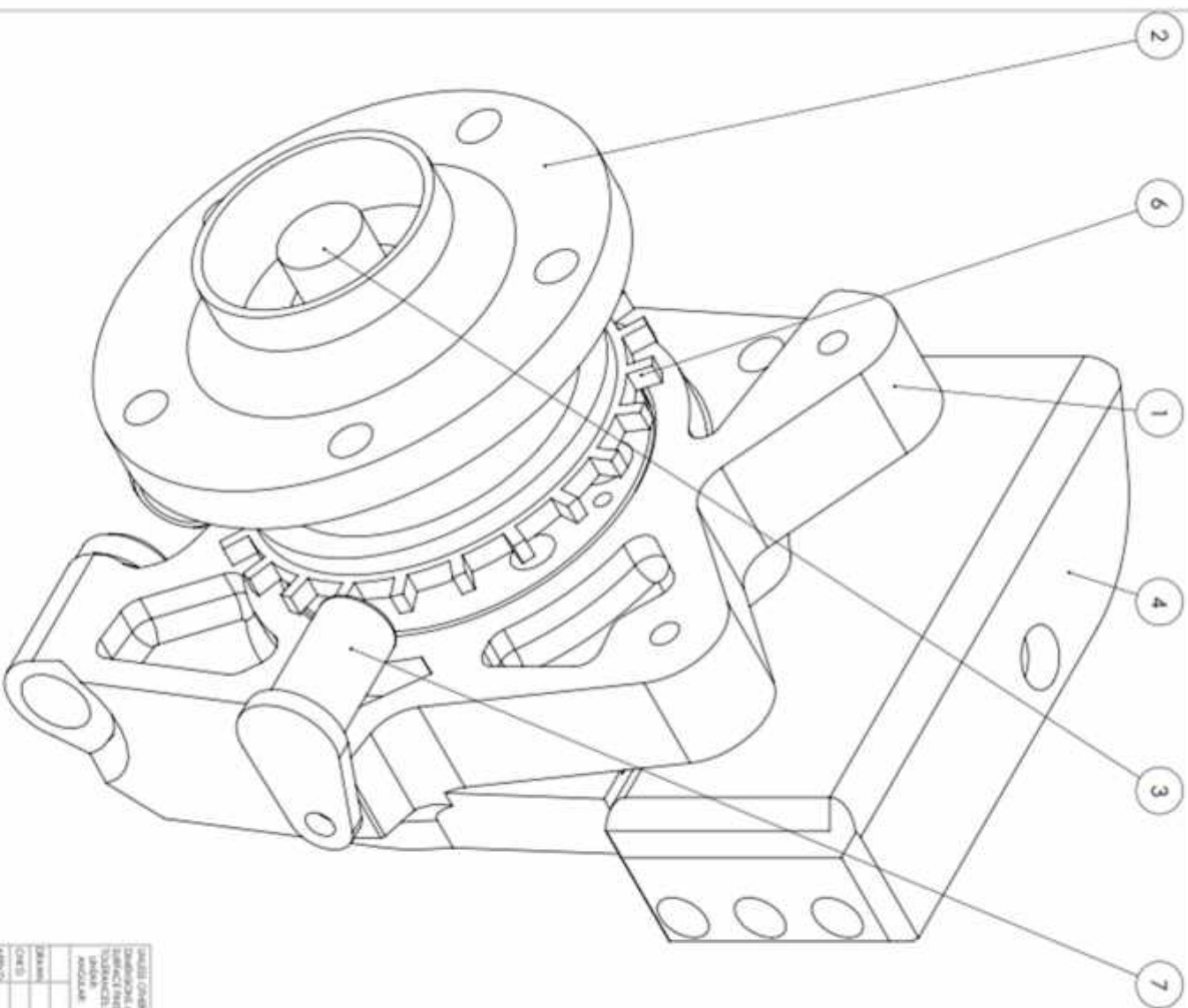
SCALE 3-4

SHEET 3 OF 4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:		<h1>Holkki</h1>	
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A.						DWG NO.		Ylätukivarsikokoonpano	
						SCALE: 2:1		SHEET 4 OF 4	
								A4	

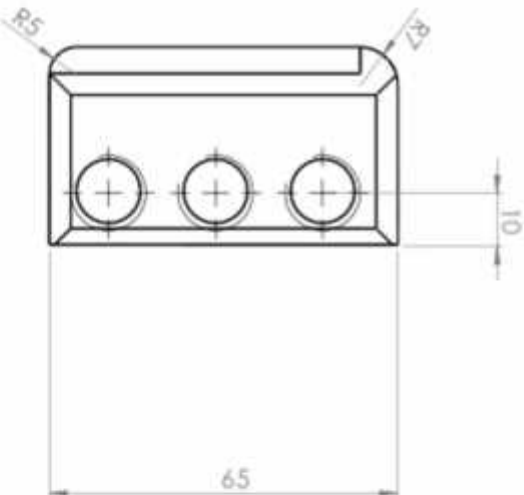
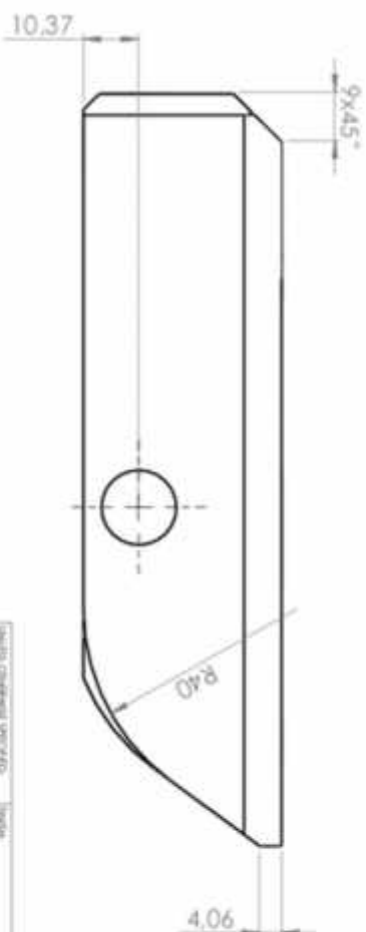
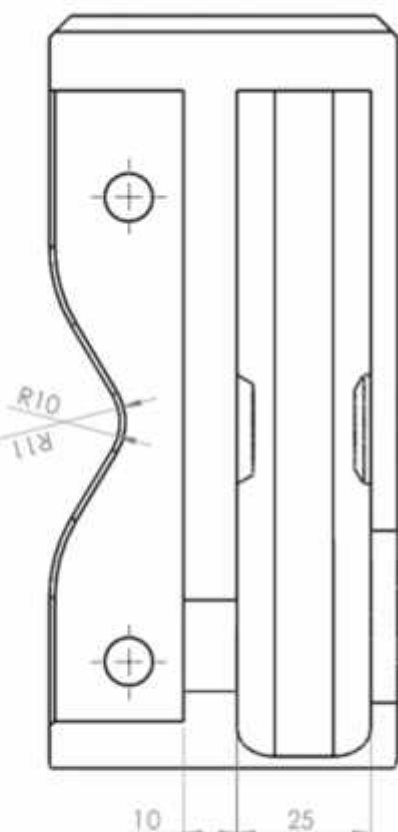
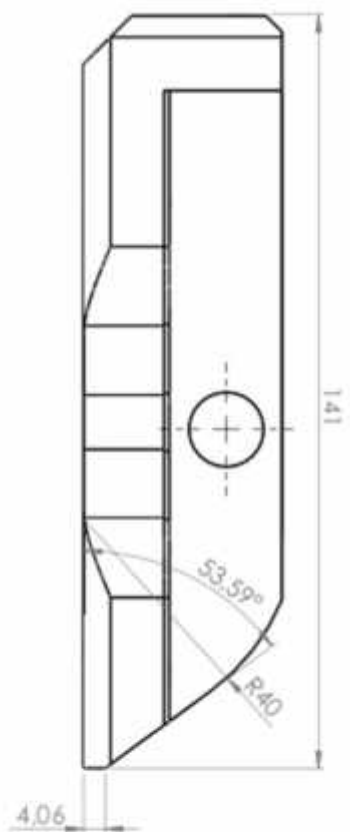
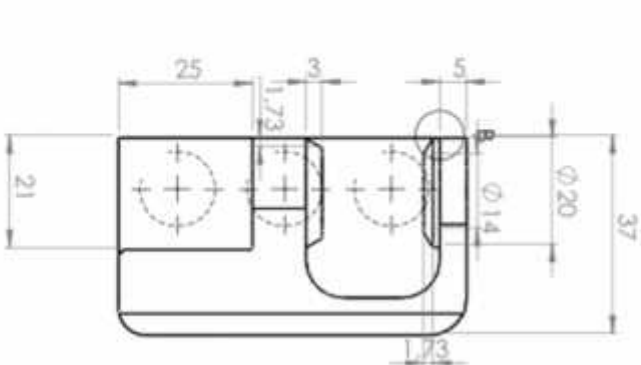
**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	upright	Olka-akseli	1
2	nappilockeri	Pyöränlackeri	1
3	Napa-akseli	Akseli	1
4	upright_väöntövarsi	Olka-akselin varsi	1
6	pyöränopeuskehä	Hammaskehä	1
7	holl-onturi	Pyöräntänopeustunnistin	1

NAME		DATE	SCALE	REVISION
DRAWN				
CHECKED				
APPROVED				
DATE				
BY				
FOR				
SCALE				
REVISION				
TITLE				
PROJECT				
SHEET				

DETAIL B
SCALE 2:1



DRAFTING SPECIFICATIONS				DRAFTING SPECIFICATIONS	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	
TOLERANCES				TOLERANCES	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED				UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	
FRACTIONS				FRACTIONS	
DECIMALS				DECIMALS	
ANGLES				ANGLES	
HIDDEN LINES				HIDDEN LINES	
FIRST ANGLE				FIRST ANGLE	
SCALE				SCALE	
NAME				NAME	
DATE				DATE	
DRAWN				DRAWN	
CHECKED				CHECKED	
APPROVED				APPROVED	
DATE				DATE	
SCALE				SCALE	
TITLE				TITLE	
Olka-akselin varsi				Olka-akselin varsi	
Pyöräkkoonpano				Pyöräkkoonpano	
A3				A3	
SHEET 1 OF 3				SHEET 1 OF 3	